Untersuchungen über den Luftverbrauch beim Blasversatzverfahren

Von der

TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZU BRESLAU

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

DISSERTATION

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Eduard DEUSCHL aus Grafing

Referent: o. Professor Dr.-Ing. G. Spackeler
Korreferent: o. Professor Dr.-Ing. W. Groß

Tag der mündlichen Prüfung: 27. November 1930

Sonderabdruck aus den Heften 2 und 3 des Jahrgangs 1931
der Berg- und Hüttenmännischen Zeitschrift »Glückauf«.

Untersuchungen über den Luftverbrauch beim Blasversatzverfahren

Von der

TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZU BRESLAU

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

DISSERTATION

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Eduard DEUSCHL aus Grafing

Referent: o. Professor Dr.-Ing. G. Spackeler
Korreferent: o. Professor Dr.-Ing. W. Groß

Tag der mündlichen Prüfung: 27. November 1930

1931
Verlag Glückauf, G. m. b. H., Essen

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Die pneumatische Förderung, d. h. die Beförderung von Massengütern in Rohrleitungen mit Hilfe von strömender Luft, ist das jüngste Glied der neuzeitlichen Fördertechnik und als solches noch am wenigsten erforscht. Immerhin liegt eine genaue Untersuchung des Fördervorganges auf versuchsmäßigem Wege vor[1], welche die grundsätzlichen Fragen zum Teil klärt, jedoch nicht die wünschenswerte Vollständigkeit aufweist.

Das Blasversatzverfahren hat in den letzten Jahren seine maschinenmäßige Durchbildung erhalten und arbeitet trotz einzelner Mängel erfolgreich in zahlreichen Betrieben. Da die Vorzüge dieser Versatzweise voraussichtlich ihren Bestand sichern, erschien es als angebracht, eine Klärung der damit verbundenen Fragen herbeizuführen. Die Möglichkeit hierzu war gegeben durch eine Anzahl gut arbeitender Anlagen, die im Betriebe geprüft werden konnten.

Bei den Versuchen konnte ich mich teilweise an die vorhandenen Untersuchungen der pneumatischen Förderung anlehnen und dann vergleichen, ob und in welchem Maße die dort gefundenen Gesetzmäßigkeiten für das Blasverfahren Gültigkeit haben, das sich vor allem durch seine Fähigkeit, vielgestaltiges und wechselndes Gut, und zwar in verhältnismäßig großen Mengen zu fördern, auszeichnet. Ein weiterer Unterschied von der pneumatischen Förderung besteht darin, daß es wegen des erforderlichen höhern Druckes nur mit Druckluft betrieben wird, während die pneumatische Förderung auch saugend arbeitet, wobei nur die Spanne zwischen 0 und 1 at zur Verfügung steht.

Der Genauigkeitsgrad der Versuche war bestimmt durch ihre Vornahme im praktischen Großbetriebe, wobei sich eine wissenschaftlich einwandfreie Nachprüfung nicht durchführen ließ. Maßgebend war die Genauigkeit, mit der man die Berge- und Luftmengen messen konnte. Diese hielt sich naturgemäß nur in einem technischen Rahmen, weshalb auch für die Feststellung der übrigen Größen eine Rechenschiebergenauigkeit als ausreichend erschien. Als Ausgleich für die mangelnde Genauigkeit der Einzelversuche kann jedoch ihre Ausdehnung auf verhältnismäßig große Fördermengen gelten.

Den Ausgangspunkt für die Untersuchungen mußte die Feststellung der Betriebsgrößen des Blasversatzverfahrens bilden, d. h. der Blasleistung, der Förderlänge, des Blasdruckes, des Rohrdurchmessers und des Luftverbrauches. Sie waren zunächst für Anlagen mit einheitlicher Leitungsform und geringstem Luftverbrauch sowie im Anschluß daran für die wichtigsten der vorkommenden Sonderfälle zu ermitteln.

[1] Gasterstädt: Experimentelle Untersuchung der pneumatischen Förderung, Forschungsarbeiten V. d. I. 1924, H. 265.

Ein besonderer Abschnitt war der Frage des Fördergutes zu widmen. Es galt, die Schwebegeschwindigkeit von Versatzgut zu bestimmen und zu prüfen, inwieweit sie als Grundlage für die Berechnung von Blasversatzanlagen angewendet werden kann. Unter Schwebegeschwindigkeit wird die Luftgeschwindigkeit verstanden, bei der ein Körper im senkrecht aufsteigenden Luftstrom den Schwebezustand erreicht. Eine Nachprüfung dieser Versuche erfolgte durch das Verblasen verschiedenartigen Versatzgutes im Betriebe.

Zur Kennzeichnung der Fördervorgänge sind die Druckverhältnisse in der Förderleitung, im besondern das Verhältnis zwischen Leerlauf- und Förderdrücken geprüft worden. Der Druckabfall gibt zugleich Aufschluß über die Geschwindigkeits- und Beschleunigungszustände in der Förderleitung.

Eine Begrenzung der Versuche ergibt sich daraus, daß lediglich die Feststellung des wirtschaftlichsten Luftverbrauches beim Blasbetrieb als Versuchsziel zu betrachten ist. Alle andern Faktoren, welche die Wirtschaftlichkeit des Blasbetriebes beeinflussen, werden bei den Betrachtungen ausgeschaltet und dementsprechend die Versuche im einzelnen beurteilt.

Grundlagen für die Strömungsvorgänge bei der pneumatischen Förderung.

Die Berechnung pneumatischer Förderanlagen für Getreide, Späne usw. erfolgt meist nach Faustformeln und Erfahrungswerten, deren Wiedergabe sich hier erübrigt[1]. Für die wissenschaftliche Betrachtung der Frage ist auszugehen von der Grundgleichung für strömende Gase und Dämpfe[2]. Macht man die Einschränkungen, daß 1. nur der Fall der waagrechten Leitung betrachtet wird, 2. kein Wärmeaustausch zwischen dem Rohrinhalt und seiner Umgebung eintritt und 3. die Änderung der kinetischen Energie auf der betrachteten Strecke klein ist gegenüber dem Wärmeinhalt der Luft, wobei deren Ausdehnung bei gleichbleibendem Wärmeinhalt angenommen werden kann, also $P_1 \cdot v_1 = P_2 \cdot v_2$ und $i_1 = i_2$ ist, so lautet die Gleichung, bezogen auf 1 kg Luft, für die Luftströmung zwischen den Querschnitten 1 und 2 einer Rohrleitung von gleichbleibendem Durchmesser:

$$\frac{w \cdot dw}{g} + \beta \frac{w^2 \cdot dL}{D} + v \cdot dP = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1.$$

Hierin bedeutet: w die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s, g die Erdbeschleunigung = 9,81 m/s², L die Rohrlänge in m, D den Leitungsdurchmesser in mm, β eine Widerstandszahl, P den absoluten Gasdruck in kg/m² und v das spezifische Volumen in m³/kg.

[1] Karg: Die Berechnung pneumatischer Förderanlagen, 1927; Grakhan: Die Berechnung der Spänetransport-Anlagen, Fördertechn. 1927, S. 92.

[2] Hütte, 23. Aufl., Bd. 1, S. 448.

Der Faktor $\frac{w \cdot dw}{g}$ stellt den durch die Beschleunigung der Luft hervorgerufenen Druckabfall dar. Bei der Berechnung pneumatischer Förder- und auch von Blasversatzanlagen kann er wegen seiner Geringfügigkeit vernachlässigt werden, so daß nur der durch die Reibung der Luft an den Rohrwänden bedingte Druckabfall zu berücksichtigen ist. Formt man die so vereinfachte Gleichung nach L und D um und integriert sie in den Grenzen 1 und 2, d. s. die beiden Rohrquerschnitte, zwischen denen die Luftströmung betrachtet wird, so ergibt sich mit Hilfe einiger Vereinfachungen die Gleichung

$$P_1 - P_2 = \frac{\lambda \cdot \gamma_L \cdot w^2 \cdot L}{2g \cdot D} \quad \ldots\ldots\ldots 2$$

(γ_L = spezifisches Gewicht der Luft).

Für die Widerstandszahl β wird hier der Widerstandskoeffizient λ eingeführt[1], da die Widerstandszahl β nach Fritzsche[2] für die praktisch glatten Rohre bei der pneumatischen Förderung zu hohe Werte liefert; $\lambda = 0{,}02745 \left(\frac{D}{G_L}\right)^{0{,}22}$ (G_L = kg Luft je h). Durch Versuche hat Gasterstädt[3] den Zusammenhang zwischen dem in der Gleichung 2 angegebenen Druckabfall für reine Luftströmung und dem bei Materialförderung untersucht. In einer gegebenen Rohrstrecke von bestimmtem Querschnitt sei der Druckabfall für die Luftmenge G_L kg/h von gegebenem Anfangsdruck bei reiner Luft gleich ΔP_L, bei Förderung der Materialmenge Gm, d. h. für das Mischungsverhältnis $\mu = \frac{Gm}{G_L}$ gleich ΔPm. Dann stellt das Verhältnis $\Delta Pm : \Delta P_L$ den spezifischen Druckabfall dar. Als grundlegendes Ergebnis haben die Versuche Gasterstädts den gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen dem Druckabfall bei reiner Luft und bei der Gutförderung nachgewiesen. Danach ist der spezifische Druckabfall bei gleichbleibender Luftmenge G_L unter sonst gleichen Verhältnissen eine lineare Funktion des Mischungsverhältnisses μ. Bezeichnet α den Neigungswinkel dieser Geraden, so ist der spezifische Druckabfall $= 1 + \mu \operatorname{tg}\alpha$. Für den Druckabfall bei der Gutförderung zwischen den Querschnitten 1 und 2 einer waagrechten Rohrleitung ergibt sich:

$$P_1 - P_2 = \Delta P = (1 + \mu \operatorname{tg}\alpha) \frac{\lambda \cdot \gamma_L \cdot w^2 \cdot L}{2g \cdot D} \quad \ldots 3.$$

Der Luftstrom befördert das Gut in der Rohrleitung durch Abgabe von Strömungsenergie, die durch die Druckhöhe in der Leitung und durch die in der Zeiteinheit durch den Rohrquerschnitt fließende Luftmenge bestimmt wird. Während der Förderung setzt sich der statische Luftdruck in Bewegungsenergie (Luftgeschwindigkeit) um, die zur Beschleunigung des Fördergutes sowie in kleinerm Maße der Luft selbst erforderlich ist. Durch die Beförderung des Gutes entsteht also in der Rohrleitung ein Druckabfall, dessen Größe in dem einzelnen Rohrquerschnitt kennzeichnend ist für die dort erforderliche Gutbeschleunigung.

Für den Arbeitsaufwand sind folgende feststellbare Größen von Bedeutung: 1. die Eigenschaften des Fördergutes, nämlich sein spezifisches Gewicht, sowie die Größe, Form und Oberflächengestalt seines Kornes, 2. die Dichte und Strömungsgeschwindigkeit der Förderluft, 3. die Richtung und Länge des Förderweges sowie etwaige Änderungen der Förderrichtung durch eingebaute Krümmer, 4. die Größe des Rohrdurchmessers und die Beschaffenheit der innern Wandung der Rohrleitung.

Besonders wichtig für die Größe der aufzuwendenden Energie sind die Eigenschaften des Fördergutes. Als Kennzeichen für die Förderfähigkeit eines Gutes wird die Schwebegeschwindigkeit angesehen, d. h. die Geschwindigkeit eines aufsteigenden Luftstromes, die den darin befindlichen Körper im Schwebezustand zu halten vermag. Ausgehend von dem Widerstand, den ein Körper einem Luftstrom bietet, ergibt sich für die Schwebegeschwindigkeit w_s einer Kugel vom Durchmesser d_k m die Gleichung:

$$w_s = \sqrt{28{,}4 \; \gamma_k/\gamma_L \cdot d_k} \quad \ldots\ldots\ldots 4,$$

worin γ_k das spezifische Gewicht der Kugel bedeutet. Mößner[1] hat eine Widerstandskurve für feste Körper in Flüssigkeiten und Gasen aufgestellt, wobei diese Gleichung der auch von Rittinger[2] benutzten Newtonschen Gleichung entspricht. Sie gilt nicht für Körper < 1 mm, wofür die Stokesche Gleichung vorzuziehen wäre. In der Gleichung 4 ist bereits eine von der Göttinger Versuchsanstalt[3] bestimmte Konstante $\psi = 0{,}23$ berücksichtigt. Gasterstädt hat diese Gleichung durch Versuche in einem konischen senkrechten Rohr, das den Vorteil der Geschwindigkeitsänderung bietet, nachgeprüft und hiermit übereinstimmende Werte gefunden. Der Wert aus der Gleichung 4 ist dann als Mittelwert anzusehen, der sich für unregelmäßig geformtes Gut im konischen Rohr aus dem Auf- und Absteigen der Körper ergibt.

Die Schwebegeschwindigkeit läßt sich nicht ohne weiteres auf das waagrechte Rohr übertragen, weil hier die Schwerkraft senkrecht zur Luftströmung angreift. Den Zusammenhang hat Gasterstädt durch Messung von Kugelgeschwindigkeiten im Förderrohr sowie durch die Bestimmung der Gutgeschwindigkeit bei der Getreideförderung untersucht. Bei der Auswertung dieser Versuche hat sich für das Verhältnis der Luftgeschwindigkeit w_o zur Schwebegeschwindigkeit w_s und zur Relativgeschwindigkeit w_r die in Abb. 1 dargestellte einfache Beziehung ergeben. Dabei ist $w_r = w_o - w_k$ (w_k = Kugelgeschwindigkeit).

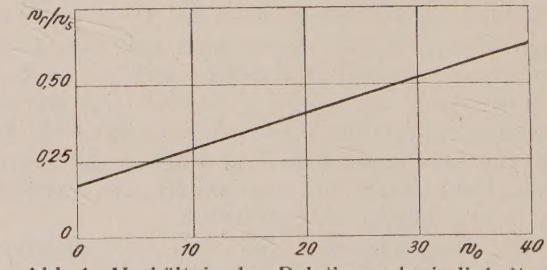

Abb. 1. Verhältnis der Relativgeschwindigkeit w_r zur Schwebegeschwindigkeit w_s in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit w_o.

Das Verhältnis $w_r : w_s$ einer Kugel von beliebigem spezifischem Gewicht zeigt demnach eine geradlinige Abhängigkeit von der Kugelgeschwindigkeit.

[1] Nach Wagner: Techn. Handbuch von Auerbach und Hort, Bd. 6, S. 772.
[2] Hütte a. a. O.
[3] a. a. O.

[1] Mößner: Der heutige Stand der pneumatischen Aufbereitung der Kohle, Dissertation, Breslau 1930.
[2] Rittinger: Lehrbuch der Aufbereitungskunde, 1864.
[3] Z. f. Flugtechn. u. M. L. 1914, S. 140.

Damit ist der Zusammenhang zwischen der Schwebegeschwindigkeit im senkrechten Rohr und der Gutgeschwindigkeit in der waagrechten Leitung nachgewiesen, so daß die Brauchbarkeit der Schwebegeschwindigkeitsbestimmung für die Ermittlung der Förderfähigkeit feststeht.

Als bedeutungsvoll erscheint hier noch die Beobachtung, daß die Materialgeschwindigkeit bei der Getreideförderung in der Gasterstädtschen Versuchsanlage im Rohrquerschnitt annähernd gleich groß ist, woraus sich auf eine gleichmäßige Luftgeschwindigkeit schließen läßt. Diese Folgerung ist jedoch nicht ohne weiteres auf die Beförderung beliebigen Gutes übertragbar.

Versuche zur Feststellung der Betriebsgrößen des Blasversatzverfahrens.

Allgemeine Bemerkungen über die Betriebsgrößen und ihre Ermittlung.

Die Durchführung der Versuche zur Feststellung der Betriebsgrößen hatte sich dem rauhen bergmännischen Betriebe anzupassen, dem auch die anzuwendenden Meßgeräte gerecht werden mußten. Ihr Zweck war vor allem die Bestimmung der Betriebsgrößen bei den für den Blasversatz günstigsten Verhältnissen.

Der Blasbetrieb wird in der Regel so durchgeführt, daß in dem zu verblasenden Streb — der Strebbau ist für die Verhältnisse des Ruhrbergbaus als übliche Abbauweise für den Blasversatz anzusehen — eine oder zwei Feldbreiten auf 1 oder 2 Rohrlängen von je 3 m Länge in ununterbrochenem Betriebe versetzt werden. Ist beim Blasvorgang der Versatz auf 1 bis 2 m an das Ende der Blasrohrleitung herangerückt, so werden das nächste Rohr oder die beiden nächsten ausgebaut usw., bis die ganze Bauhöhe des Strebs in der Breite eines oder zweier Felder versetzt ist.

Die Blasleistung bedarf einer genauern Kennzeichnung. Bei Blasbeginn wird nämlich die volle Blasleistung erst allmählich erreicht, ebenso wie am Ende des Blasens Leerlauf eintritt. In Abb. 2 ist der Verlauf des Blasvorganges schematisch wiedergegeben. Die

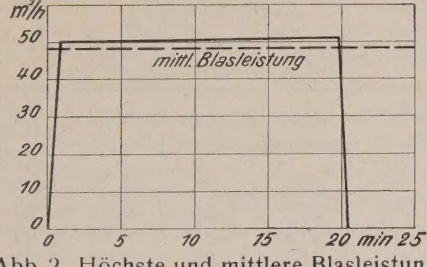

Abb. 2. Höchste und mittlere Blasleistung.

mittlere Blasleistung, die demnach etwas geringer als die höchste erreichte ist, muß auf eine durchschnittliche auf einmal verblasene Bergemenge bezogen werden, weil sich die Blasabschnitte am Anfang und Ende des Blasens auf verschieden große Bergemengen verteilen und die Blasleistung sonst nicht vergleichbar wäre. Im Durchschnitt der Betriebe werden ohne Unterbrechung 8–16, im Mittel also 12 m³ Berge verblasen. Die Blaspausen kann man bei der Feststellung der Blasleistung nicht berücksichtigen, weil sie je nach den örtlichen Verhältnissen zwischen 1 und 20 min schwanken.

Die verblasene Bergemenge wird in m³ gemessen, denn nur auf die Ausfüllung des Hohlraumes kommt es vom Standpunkt der Versatzwirtschaft aus an. Als Vergleichswert genügt dieser Begriff auch für die vorliegenden Betrachtungen, abgesehen von einzelnen Fällen, in denen sie in t/h umgerechnet wird. Das durchschnittliche Schüttgewicht der Waschberge, wie sie an der Kippstelle ankommen, sei zu 1600 kg/m³ angenommen. Die Blasleistung bezeichnet also die in einer bestimmten Anlage verblasene Bergemenge in m³/h (oder t/h), wenn jeweils ohne Unterbrechung 12 m³ Berge eingebracht und die Blaspausen nicht berücksichtigt werden.

Die Messung der Bergemenge erfolgte durch Zählung der in den Bergespeicher der Blasanlage gekippten Wagen, wobei der Füllungsgrad der Wagen schätzungsweise berücksichtigt wurde. Betrieblich ging man so vor, daß man den Bergebehälter vor Beginn eines Versuches jeweils bis oben hin füllte. Die während eines Versuches verblasenen Bergemengen wurden in die Zahlentafeln eingetragen, woraus sich ein Anhalt für die Versuchsgenauigkeit ergibt. Die Blaszeit wurde mit der Stechuhr oder nach dem Diagramm des Luftmessers bestimmt.

Zur Luftmessung diente in allen Fällen ein Staurand, der in der Regel mit einem Askaniamesser oder mit einer während des Versuches beobachteten Quecksilbersäule (Handmessung) in Verbindung stand. Die Genauigkeit der mechanischen Luftmesser wurde durch Handmessung nachgeprüft. Die Luftmenge wird in m³ angesaugter Luft angegeben, da dies für die Mehrzahl der Versuchszwecke hinreichend genau ist. In besondern Fällen wird der Luftverbrauch in kg/h umgerechnet.

Leerlauf- und Blasdruck sind die an der Aufgabemaschine vor dem Eintritt der Berge in den Luftstrom herrschenden Drücke bei reiner Luft und beim Blasvorgang. Sie werden am Aufgabemanometer abgelesen, das dem Maschinenführer zur Beurteilung des Blasvorganges dient. Die Manometer wurden durch Vergleich mit einem von der Physikalisch-technischen Reichsanstalt geeichten Manometer geprüft. Der dem Blasdruck entsprechende Leerlaufdruck ließ sich infolge verschiedener, im Betriebe nicht beeinflußbarer Faktoren nur in 2 Versuchsanlagen übertage sorgfältiger bestimmen. Diese Zahlen dienen dann zur Erörterung der theoretischen Fragen, die den Zusammenhang zwischen Leerlauf- und Förderdruck behandeln. In den Versuchsübersichten ist in der Regel nur der Blasdruck angegeben, der durch den verstärkten Widerstand entsteht, den das Luft-Bergegemisch dem Luftstrom bietet. Er ist durch den Maschinenführer regelbar, der dem Taschen-[1] oder Zellenrad[2] eine größere oder geringere Umdrehungszahl erteilen kann, wodurch sich der Blasdruck entsprechend ändert. Um eine große Blasleistung zu erreichen, muß der Maschinenführer mit einem möglichst hohen Blasdruck fahren. Er darf anderseits nicht über einen durch die Anlage bestimmten Druck hinausgehen, weil sonst eine Verstopfung der Förderleitung eintritt. Der zweckmäßigste Blasdruck wird auch durch die Art des Versatzgutes beeinflußt. Soweit die Versuche mit Waschbergen durchgeführt worden sind, gilt der Blasdruck für eine mittlere Mischung bei Korngrößen von 0–100 (bei 200 mm Rohrdurchmesser bis 150) mm. Bei ungünstigem Fördergut muß man den Blasdruck zur Vermeidung von Ver-

[1] Glückauf 1927, S. 448, Abb. 7 und 8.
[2] Glückauf 1928, S. 429, Abb. 2.

stopfungen oft niedriger halten. Die Blasleistung ist also insofern vom Maschinenführer abhängig, als er mit mehr oder minder großer Vorsicht fahren kann. Die obere Grenze des Blasdruckes erkennt er daran, daß das Aufgabemanometer schnell aufeinander folgende Druckschwankungen anzeigt.

In den Versuchsübersichten wird ferner der Luftverbrauch für 1 m³ Berge angegeben, eine als Kennziffer für den Luftverbrauch einer Blasanlage viel verwendete Zahl, die hier als spezifischer Luftverbrauch bezeichnet sei. Als Vergleichswert wird er auf 760 mm Q.-S. und 20° C berechnet.

Für die Fördervorgänge ist die Luftgeschwindigkeit in der Rohrleitung wichtig. Wegen der Durchwirbelung der Luft wird angenommen, daß sich eine mittlere Luftgeschwindigkeit einstellt. Aus dem Luftverbrauch und dem Rohrdurchmesser der Blasanlage läßt sich die Geschwindigkeit am Ende der Blasleitung ermitteln. Die Luftgeschwindigkeit am Anfang der Rohrleitung (d. h. hinter der Aufgabemaschine) wird auf Grund des Gesetzes $P_1 \cdot v_1 = P_2 \cdot v_2$ berechnet. Temperaturänderungen in der Blasleitung kann man vernachlässigen. Die Geschwindigkeitszunahme, die dadurch entsteht, daß die Berge einen geringen Raumteil des Luft-Bergegemisches einnehmen, wird schätzungsweise durch Aufrundung berücksichtigt.

Versuche bei den für den Blasbetrieb zweckmäßigsten Verhältnissen.

Abb. 3 zeigt die für den Blasbetrieb beim Strebbau übliche und einfachste Form der Blasleitung, die aus einer gut ausgerichteten waagrechten Streckenleitung und der mit Hilfe eines 90°-Krümmers angeschlossenen abfallenden Strebleitung besteht. Bei den hier anzuführenden Versuchen betrug das Einfallen

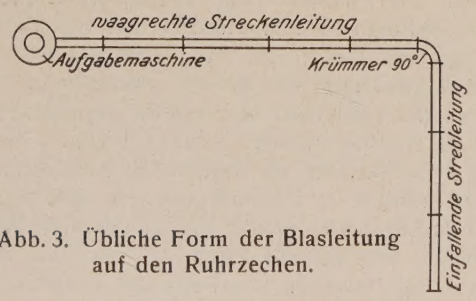

Abb. 3. Übliche Form der Blasleitung auf den Ruhrzechen.

der Strebrohrleitung im Durchschnitt 10°. Diese Form der Blasleitung sei als Normalleitung bezeichnet und diene als Vergleichsanlage für die folgenden Versuche. Bei diesen Anlagen hatte der Strebkrümmer einen Krümmungsradius von 0,75 m, was von Einfluß auf die Vorgänge in der Blasleitung ist. Als Fördergut kamen nur Waschberge zur Anwendung, die, wenigstens vorläufig, das übliche Versatzgut für die Blasanlagen des Ruhrbezirks darstellen.

Versuche in der Blasleitung von 150 mm Durchmesser.

In der Blasanlage der Zeche A wurden die eingehendsten Versuche angestellt, weil hier sehr günstige betriebliche Voraussetzungen für ihre Durchführung bestanden. Vor allem konnten die Betriebsgrößen bei erheblichen Unterschieden in der Förderlänge festgestellt werden. Die Förderlänge ändert sich einerseits dadurch, daß der Streb in wenigen Tagen verblasen wird, anderseits durch das Vortreiben des Abbaus.

Kennzeichen der Blasanlage auf der Zeche A: Torkret-Zweikammermaschine, Förderrohre mit Porzellanfutter, Flözeinfallen 10°, Luftmessung mit Siemensmesser.

Der Einfluß, den die Änderung der Strebförderlänge beim Verblasen des Strebs auf Blasleistung und Blasdruck ausübt, ergibt sich aus Abb. 4,

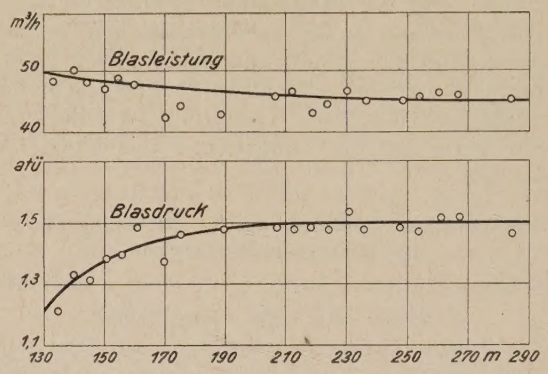

Abb. 4. Blasdruck und Blasleistung bei veränderlicher Strebförderlänge und 130 m Streckenlänge.

die einen Auszug aus den beim Verblasen des Strebs mit dem üblichen Bergematerial gemachten Beobachtungen darstellt. Die starke Streuung der Punkte in den beiden Kurven erklärt sich aus der ungleichmäßigen Zusammensetzung des Versatzgutes, nach der sich die Umdrehungszahl des Taschenrades und damit auch die Blasleistung richtet. Diese weicht im Mittel sämtlicher Beobachtungen an dieser Versatzanlage um ± 10 % von den Durchschnittswerten ab. Erst wenn die Blasleitung im Streb auf rd. 30 m verkürzt ist, nimmt die Blasleistung merklich zu, während der mittlere Blasdruck etwas sinkt. Im übrigen wird der Einfluß der Strebförderlänge in Abb. 4 durch den überragenden Einfluß des Blasgutes verdeckt.

Ein besseres Bild von dem Einfluß der Strebförderlänge geben die in der Zahlentafel 1 zusammengestellten Mittelwerte aus eingehendern Versuchen mit der Blasanlage A.

Zahlentafel 1.

Versuchstage 16.–23. Dezember 1929, Streckenförderlänge 200 m.

Strebförderlänge von m	Strebförderlänge bis m	Blasleistung m³/h	Fördermenge m³	Luftverbrauch m³/h	Spez. Luftverbrauch m³/m³	Blasdruck atü
170	120	42,3	608	3930	94	1,60
117	60	43,4	441	3970	91	1,60
57	0	44,1	390	3950	91	1,55

Die Zahlen der Tafel zeigen eine geringe Zunahme der Blasleistung mit der Verkürzung der Strebförderlänge, und zwar je 50 m Strebrohrlänge um rd. 1 %. Für Vergleiche wird eine Strebförderlänge von 100 m zugrunde gelegt und der Mittelwert der Blasleistungen bei andern Streblängen entsprechend der vorstehenden Feststellung verändert. In den Zahlentafeln dient zur Kennzeichnung jeweils die größte Strebförderlänge.

Der Luftverbrauch in der Anlage A hing, da das Luftventil stets voll geöffnet war, vom Druck in der Zechenniederdruckleitung ab, aus der die Luft entnommen wurde. Der höchste Luftverbrauch, der beim Blasen eintreten konnte, betrug 4000 m³/h, der

niedrigste etwa 3600 m³/h. Die obere Luftverbrauchsgrenze lag also zwangsläufig fest.

Den Einfluß der waagrechten Förderlänge lassen in der Zahlentafel 2 die Mittelwerte einiger in größern Zeitabständen ausgeführten Versuche erkennen.

Diese Übersicht beweist die Abhängigkeit der Blasleistung von der waagrechten Streckenlänge sowie in geringem Grade vom Luftverbrauch. Wo bei größern Entfernungen eine geringere Luftmenge angewendet wird, geht die Leistung etwas zurück. Mit zunehmender Leitungslänge vermindert sich die Luftgeschwindigkeit am Anfang der Leitung infolge des steigenden Blasdruckes. Die Blasleistung sinkt mit zunehmender Förderlänge.

Zahlentafel 2.

Versuchstage	Waagrechte Förderlänge m	Blasleistung m³/h	Fördermenge m³	Luftverbrauch m³/h	Spezifischer Luftverbrauch m³/m³	Blasdruck atü	Luftgeschwindigkeit Anfang m/s	Luftgeschwindigkeit Ende m/s
1929:								
15. 5.	55	47,7	52	3720	79	1,30	26	59
5. 6.	65	45,5	124	3770	84	1,35	26	60
14. 6.	76	46,0	35	3740	83	1,35	26	60
6. 9.	130	48,2	73	3730	79	1,45	25	59
10.—12. 9.	134	46,2	580	3750	82	1,45	25	60
11. 10.	165	44,3	185	3770	86	1,52	25	60
16.—23. 12.	200	43,2	1540	3890	91	1,60	24	62
1930:								
28. 1.	240	39,2	208	3780	98	1,68	23	60
7. 3.	268	37,5	82	3760	101	1,85	22	60
16. 4.	288	39,0	95	3920	102	1,90	22	62
17. 5.	314	39,3	148	3850	99	2,00	21	61

Versuche in der Blasleitung von 200 mm Durchmesser.

In der Mehrzahl der Blasanlagen war es nicht, wie im vorstehenden Falle, möglich, die Bergemengen nach dem Verblasen des einzelnen Rohres festzustellen. Dort mußte ich mich damit begnügen, die je Schicht verblasenen Bergemengen zu ermitteln. Die Versuche auf der Zeche B geben die bei der Blasleitung von 200 mm Dmr. auftretenden Betriebsgrößen wieder und gestatten die Feststellung der durch den verschlußlosen Bergespeicher entwichenen Luftmenge. Zur Vereinfachung der Blasanlage hatte die Torkretgesellschaft einen Bergespeicher vorgesehen, der zugleich den Luftabschluß nach oben bewirken sollte. Feines, nasses, schlammartiges Fördergut bildete jedoch in diesem Behälter häufig eine luftundurchlässige Schicht, die gewölbeartig hängen blieb und das Nachrutschen der Berge in das Taschenrad verhinderte. Dadurch traten Förderhemmungen auf, die schließlich durch einen luftdichten Abschluß des Behälters beseitigt wurden. Da die Versuche teils mit, teils ohne diesen Verschluß stattfanden, war der Luftverlust der verschlußlosen Maschine zu ermitteln. In der Zahlentafel 3 sind die Mittelwerte der über je eine Schicht sich erstreckenden Versuche bei 100 m größter Strebförderlänge angegeben.

Zahlentafel 3.

Versuchstage	Luftverbrauch m³/h	Blasleistung m³/h	Blasdruck atü	Spez. Luftverbrauch m³/m³	Waagr. Förderlänge m	Luftgeschw. Anfang m/s	Luftgeschw. Ende m/s
17.4.29[1]	8720	62,6	1,20	140	90	35	76
25.4.29[2]	7050	69,0	1,10	103	96	30	62
5.6.29[3]	6500	64,2	1,20	102	110	27	58
	Vergleichswerte[3]						
	6500	65,3	—	100	100	27	58

[1] Ohne Drosselscheibe. — [2] Mit Drosselscheibe. — [3] Mit Drosselscheibe und Behälterverschluß.

Kennzeichen der Blasanlage B: Torkret-Einkammermaschine, Flözeinfallen 8°, Luftmessung von Hand.

Der Versuch vom 17. April weist gegenüber den andern Versuchen einen besonders hohen Luftverbrauch auf. Der mittlere Luftverbrauch während der Schicht wurde sogar teilweise um 30 % überschritten. Im Gegensatz zur Blasanlage A hatte es der Maschinenführer in der Hand, durch eine größere Öffnung des Luftventils den Luftverbrauch auf nahezu 12000 m³/h zu steigern. Befinden sich nun wenig geeignete Waschberge in der Blasleitung, so sinkt die Förderleistung. Der Maschinenführer erkennt das und öffnet, in der Absicht, die übliche Leistung aufrechtzuerhalten, das Luftventil immer mehr, wodurch aber die Blasleistung nur geringfügig steigt. Um Luftvergeudung zu verhüten, baute man daher beim Versuch vom 25. April eine Drosselscheibe ein und verminderte damit den Luftverbrauch um 20 %. Bei dem nach Einbau des Behälterverschlusses ausgeführten Versuch vom 5. Juni ergab sich ein weiterer Minderverbrauch von 8 % gegenüber dem zweiten Versuch. Die insgesamt ermittelte Luftersparnis ist als der eigentliche Behälterverlust anzusprechen.

Der Unterschied in den Blasleistungen bei den drei Versuchen ist angesichts der geringen Unterschiede in der Förderlänge auf das Fördergut zurückzuführen, das beim zweiten Versuch am günstigsten war; hier sank auch der Blasdruck infolge des geringern Luftverbrauchs erheblich. Dem Vergleichswert wurden die mittlere Blasleistung aus den drei Versuchen sowie der geringste Luftverbrauch zugrunde gelegt.

Zahlentafel 4.

Versuchszeit April 1930.

Luftverbrauch m³/h	Blasleistung m³/h	Fördermenge m³	Spezifischer Luftverbrauch m³/m³
7740	61,0	524	128
6280	66,9	420	95
5540	57,4	681	96
4660	51,1	473	92
im Mittel 6200	61,9	(zus. 2098)	101

Die erörterten Versuche finden ihre Bestätigung in den in der Zahlentafel 4 aus dem Monatsdurchschnitt der Anlage C errechneten Betriebsgrößen.

Kennzeichen der Blasanlage C: Torkret-Zweikammermaschine, Flözeinfallen 15°, waagrechte Förderlänge 70–90 m, Größte Strebförderlänge 80 m, Luftmessung mit Askaniamesser.

Bei den in den einzelnen Zeilen wiedergegebenen Versuchen fällt auf, daß dem höchsten Luftverbrauch nicht auch die größte Blasleistung entspricht und daß die Blasleistung nicht in demselben Maße wie der Luftverbrauch abnimmt. Dies erklärt sich daraus, daß die Anordnung der Versuche nach dem Luftverbrauch zugleich die verschiedene Förderfähigkeit des Versatzgutes widerspiegelt. Je geeigneter die Waschberge für die Förderung sind, desto weniger wird das Luftventil vom Maschinenführer geöffnet, weil er dann auch mit kleinen Luftmengen eine gute Blasleistung erzielt; je größer also der Luftverbrauch, desto ungeeigneter ist das Fördergut.

Bemerkenswert ist bei den Versuchen in der Leitung von 200 mm Dmr. noch die Beobachtung, daß sich die Blasleistung beim Verblasen feinkörniger und schlammiger Massen stärker vermindert als bei 150 mm Rohrweite. Sie ist teilweise auf 70–80 % der üblichen Förderleistung gesunken.

Versuche in der Blasleitung von 250 mm Durchmesser.

Torkretanlagen mit 250 mm Rohrdurchmesser sind bisher im Ruhrbezirk nicht errichtet worden, während die mit Zellenrad ausgestatteten Miaganlagen aus später zu erörternden Gründen hier nicht eingereiht werden können. Die Zellenradanlage D entspricht jedoch annähernd den geschilderten Verhältnissen; ihre Betriebsgrößen sind daher in der Zahlentafel 5 aufgeführt.

Kennzeichen der Anlage: Zellenrad der Mitteldeutschen Industrie A.G., Flözeinfallen 12°, waagrechte Streckenlänge 60 m, größte Strebförderlänge 100 m.

Zahlentafel 5.

Luftverbrauch m³/h	Blasleistung m³/h	Fördermenge m³	Blasdruck atü	Spez. Luftverbrauch m³/m³	Luftgeschw. Anfang m/s	Luftgeschw. Ende m/s
12 100	78,0	8,5	0,5	155	46	69
11 180	72,0	5,5	0,5	156	43	64
10 900	70,5	5,8	0,5	156	42	62
10 900	67,0	8,5	0,5	164	42	62
11 300	65,7	8,3	0,5	174	43	64
im Mittel 11·240	70,2	.	0,5	160	43	64

Der Versuch beschränkte sich zwar auf eine geringe Bergemenge, ist aber trotzdem für den Vergleich brauchbar, weil das Versatzgut mittelmäßige Fördereigenschaften besaß. Gegenüber den Anlagen mit 200 mm Rohrdurchmesser ist die Blasleistung etwas gestiegen, während der Luftverbrauch, vor allem wohl infolge des sehr niedrigen Blasdruckes, erheblich zugenommen hat.

Folgerungen aus den Versuchen zur Feststellung der zweckmäßigsten Verhältnisse.

Die vorstehenden Versuche konnten aus verschiedenen Gründen nicht vollständig durchgeführt werden. Mit Hilfe der eingehenden Versuche auf der Zeche A bei 150 mm Rohrdurchmesser läßt sich jedoch unter Zugrundelegung eines ähnlichen Verhaltens auch ein Überblick über die Betriebsgrößen bei 200 und 250 mm Rohrdurchmesser geben. Diese Annahme erscheint als gerechtfertigt angesichts der geringen Unterschiede im Rohrquerschnitt und der Tatsache, daß sich bei den verschiedenen Rohrdurchmessern nirgends wesentliche Abweichungen gezeigt haben. Für den Verlauf der Betriebsgrößen in den Leitungen von 200 und 250 mm Dmr. genügte also die Feststellung einzelner Versuchspunkte.

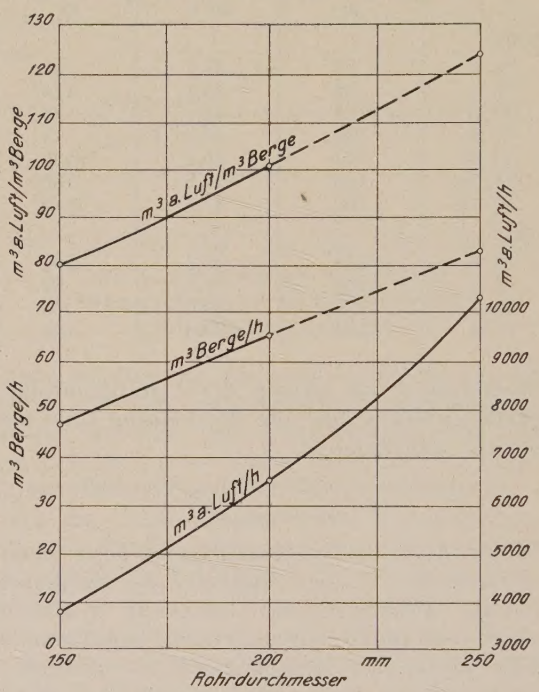

Abb. 5. Blasleistung, Luftverbrauch und spezifischer Luftverbrauch in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser bei 100 m waagrechter Strecken- und 100 m größter Streblänge.

In Abb. 5 sind auf Grund der Versuchsergebnisse zunächst Blasleistung, Luftverbrauch und spezifischer Luftverbrauch bei konstanter Förderlänge und zweckmäßigstem Blasdruck in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser aufgetragen. Daraus läßt sich entnehmen, daß die Blasleistung eine Funktion des Rohrdurchmessers ist. Da sich die Blasleistungen bei 150 und 200 mm Rohrdurchmesser annähernd wie die zugehörigen Rohrdurchmesser verhalten, wird für die Anlagen von 250 mm Dmr., für die ein genauer Versuch nicht vorliegt, dasselbe angenommen (gestrichelte Linien). Der Luftverbrauch nimmt in höherm Maße zu als die Förderleistung, und zwar verhält er sich bei verschiedenen Rohrleitungen wie ihre Querschnitte. Da somit der Luftverbrauch eine quadratische, die Blasleistung aber eine geradlinige Funktion des Rohrdurchmessers ist, ergibt sich ein zunehmender spezifischer Luftverbrauch mit zunehmendem Leitungsdurchmesser. Für die in Abb. 5 dargestellten Verhältnisse (s. die Zahlentafeln 2, 3 und 5), nimmt der spezifische Luftverbrauch von 80 m³/m³ bei 150 mm Rohrdurchmesser auf 101 m³ (= 26 %) bei 200 und auf 123 (= 53 %) bei 250 mm Dmr. zu.

Aus Abb. 6 ist die Blasleistung in Abhängigkeit von der waagrechten Förderlänge bei zweckmäßigstem Blasdruck und konstantem Luft-

verbrauch zu entnehmen. Bei gleichbleibendem Luftverbrauch nimmt demnach die Blasleistung von 0 bis 300 m waagrechter Streckenlänge um rd. 25 % ab. Größere Förderlängen konnten nicht untersucht werden. Die Leistungskurven für 200 und 250 mm Rohrdurchmesser wurden der ausführlich ermittelten Kurve bei 150 mm Dmr. nachgezeichnet, wobei der aus Abb. 5 hervorgehende Kurvenpunkt für die Zeichnung der Kurve bei 250 mm Dmr. eingesetzt werden mußte.

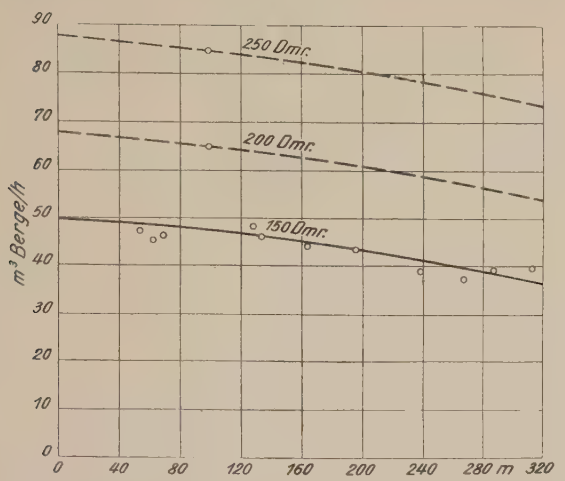

Abb. 6. Blasleistung in Abhängigkeit von der waagrechten Förderlänge bei 100 m größter Strebförderlänge für die verschiedenen Rohrdurchmesser.

Schließlich ist in Abb. 7 der zweckmäßigste Blasdruck in Abhängigkeit von der Förderlänge bei mittlerer Blasleistung und konstantem Luftverbrauch wiedergegeben. Hierbei wird unter mittlerer Blasleistung der für die entsprechende Förderlänge aus Abb. 6 ersichtliche Wert verstanden. Die sorgfältigsten Angaben sind wiederum für die Blasanlage von 150 mm Dmr. vorhanden. Für den Leitungsdurchmesser 200 mm stehen einige Werte zur Verfügung, während der Versuchspunkt für 250 mm Dmr. eine geschätzte Zahl darstellt. Auffallenderweise zeigt die Blasdruckkurve von rd. 200 m ab ein stärkeres Ansteigen. Der Kurvenverlauf über 300 m hinaus kann auch beim Blasdruck nicht verfolgt werden, weil die entsprechenden Versuche fehlen.

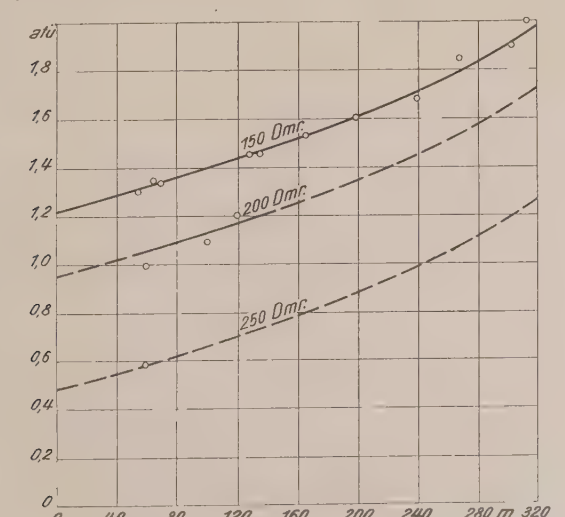

Abb. 7. Blasdruck für verschiedene Rohrdurchmesser in Abhängigkeit von der waagrechten Förderlänge bei 100 m Strebförderlänge.

Versuche zur Feststellung der Betriebsgrößen des Blasverfahrens bei besondern Verhältnissen.

Ein Teil der untersuchten Blasanlagen weicht entweder im äußern Bau (Einschaltung mehrerer Krümmer, Verblasen strebaufwärts) oder hinsichtlich des Luftverbrauches und Blasdruckes von den beschriebenen zweckmäßigsten Verhältnissen ab, bei denen der geringste spezifische Luftverbrauch erzielt wird.

Verblasen strebaufwärts.

Beim Verblasen strebaufwärts erzielte man, wie aus der Zahlentafel 6 hervorgeht, eine erheblich geringere Blasleistung. Die angeführten Betriebsgrößen, die dem aufwärts verblasenen Streb der Blasanlage C entstammen, sind wieder nach dem Luftverbrauch geordnet.

Zahlentafel 6.

Versuchszeit April 1930.

Luftverbrauch m³/h	Blasleistung m³/h	Fördermenge m³	Spezifischer Luftverbrauch m³/m³
6680	57	836	117
5810	46	493	127
4550	38	369	121
im Mittel 5960	49,6	(zus. 1698)	121

Vergleicht man den Mittelwert mit der Blasleistung bei zweckmäßigsten Verhältnissen für 200 mm Rohrdurchmesser (65 m³/h), so ergibt sich demgegenüber ein Rückgang der Blasleistung auf 75 %. Anderseits ist der Luftverbrauch um 10 % niedriger. Der Hauptanteil der geringern Blasleistung ist aber durch die Arbeitsleistung entgegen der Schwerkraft bedingt. Der spezifische Luftverbrauch ändert sich mit abnehmendem Luftverbrauch nur geringfügig. Dies ist wieder darauf zurückzuführen, daß ein niedriger Luftverbrauch nur bei günstigem Fördergut genügt, während weniger geeignetes Gut bei größerm Luftverbrauch verblasen werden muß. Bemerkt sei hier noch, daß ungünstiges Gut, wie schlammige und feinkörnige, nasse Waschberge, beim Strebaufwärtsblasen eine besonders geringe Blasleistung aufweist.

Blasleitung nur im Einfallen verlegt.

Die Versatzmaschine der Firma Beien in Herne (Bauart König)[1] dient lediglich als Strebfördermittel und eignet sich deshalb zur Feststellung der Betriebsgrößen in abfallenden Leitungen. In der Zahlentafel 7 sind die vom Verein zur Überwachung der Kraftwirtschaft der Ruhrzechen ermittelten Versuchsergebnisse angegeben.

Kennzeichen der Anlage: Flözeinfallen 15°, Durchmesser der Blasleitung 150 mm, größte Förderlänge 100 m.

Zahlentafel 7.

Luftverbrauch m³/h	Förderleistung m³/h	Fördermenge m³	Spezifischer Luftverbrauch m³/m³
1700	29,3	35	58

Diese Zahlen bestätigen, daß eine nur im Einfallen verblasende Anlage einen weit geringern Luftbedarf hat. Der Luftverbrauch ist gegenüber dem früher für die normale Leitungsform festgestellten

[1] Glückauf 1930, S. 763.

Wert um 45 %, der spezifische Luftverbrauch um 27 % geringer. Die angegebene Förderleistung gilt nur für das Verblasen eines Bergewagens. Zwischen dem Verblasen zweier Bergewagen trat nämlich bei dem Versuch jeweils eine Unterbrechung des Blasvorganges ein, weshalb die genannte Förderleistung mit der Blasleistung nicht ganz vergleichbar ist.

Einfluß einer gekrümmten Blasleitung.

Der Einbau mehrerer Krümmer in die Blasleitung setzt die Blasleistung stark herab, besonders, wenn die Krümmer in kurzen Abständen aufeinander folgen. So wurde auf der Zeche E, wo vier 90°-Krümmer von 0,75 m Krümmungsradius mit Abständen von 4, 50, 20 und 10 m eingebaut waren, eine Verminderung der Blasleistung auf 43 % der üblichen beobachtet.

In der Blasanlage der Zeche D waren zahlreiche kleine Krümmungen in der Streckenleitung vorhanden. Zudem wurde der Versatz in ein Flöz von 0,80 m Mächtigkeit eingeblasen, so daß auch die Strebleitung nicht gut ausgerichtet werden konnte. Die Folge davon war, daß sich die ganze Förderleitung nicht dicht halten ließ, wodurch der Luftverbrauch den sonst üblichen um 60 % überschritt, während die Blasleistung infolge des Widerstandes, den das Gut in den vielen kleinen Krümmungen fand, nur 75 % des entsprechenden Wertes betrug.

Die Betriebsgrößen bei Miaganlagen.

Einleitend sei ausdrücklich betont, daß hier kein Urteil über die Wirtschaftlichkeit eines bestimmten Verfahrens gefällt, sondern lediglich eine zahlenmäßige Aufstellung gegeben werden soll, bei der auch der Preisunterschied für Luftmengen verschiedener Druckhöhen unberücksichtigt bleibt.

Für die Prüfung der besondern Eigenschaften der Miaganlagen wurde mir von der Zeche G eine Versuchsanlage übertage zur Verfügung gestellt, wobei 1. mit 150 m Förderlänge (bei 100 m Abstand vom Zellenrad war ein 90°-Krümmer eingebaut), 2. mit einer geraden Förderlänge von 108 m verblasen werden konnte.

Die zu verblasenden Bergemengen sind bei einer Versuchsanlage natürlich beschränkt. Bei jedem Versuch wurde ein Bergewagen von bestimmtem Füllungsgrad verblasen und die Blasleistung wie früher auf das Verblasen von 12 m³ Berge umgerechnet. Durch die Verwendung von mittlerem Versatzgut erzielte man etwa die Genauigkeit der untertage ausgeführten Versuche. Der verfügbare größte Blasdruck betrug 0,45 atü, wobei der Kompressor rd. 7000 m³ a. L./h lieferte. Diese Luftmenge ließ sich durch einen Anschluß an das Niederdrucknetz der Zeche auf rd. 11000 m³/h vermehren. Aus der Zahlentafel 8 sind die ermittelten Betriebsgrößen, geordnet nach dem Luftverbrauch, zu ersehen.

Kennzeichen der Anlage: Zellenrad der Mitteldeutschen Industrie A.G., Durchmesser der Blasleitung 250 mm, Luftmessung von Hand.

Eine Zunahme der Blasleistung mit zunehmendem Luftverbrauch findet nur in geringem Maße statt. Bei 108 m Förderlänge beobachtet man sogar einen Rückgang. Dies erklärt sich durch den geringen Blasdruck, der infolge von Undichtigkeiten in der Luftzufuhrleitung nicht höher gehalten werden konnte. Vergleicht man die vorstehenden Zahlen mit den aus Abb. 5 ersichtlichen Betriebsgrößen für 250 mm Rohrdurchmesser, so ergibt sich eine um 62 % geringere Blasleistung, während der Luftverbrauch rd. 70 % ausmacht. Der Blasdruck beträgt etwa 60 % des nach Abb. 7 zu erwartenden Druckes.

Zahlentafel 8.

	Luftverbrauch m³/h	Blasleistung m³/h	Spez. Luftverbrauch m³/m³	Blasdruck atü	Luftgeschw. Anfang m/s	Luftgeschw. Ende m/s
			150 m waagrechte Förderlänge			
	6460	29,9	215	0,40	26	37
	7130	31,5	225	0,45	28	41
	8770	32,3	270	0,43	35	50
im Mittel	7450	31,2	244	0,43	30	43
			108 m waagrechte Förderlänge			
	6360	27,2	230	0,34	27	36
	9830	23,5	414	0,26	45	56

Von der Zeche H wurden mir die Ergebnisse dort ausgeführter Versuche überlassen, welche die Blasleistung einer Zellenradanlage bei verschiedenen Förderlängen erkennen lassen; durchschnittlich ist dabei eine Luftmenge von 7200 m³/h angewendet worden. Da man nicht Waschberge, sondern Klaubeberge und Dolomit verblasen hat, sind die Feststellungen nicht ohne weiteres vergleichbar; sie geben aber ein gutes Bild von dem Einfluß der Förderlänge auf die Leistung (Abb. 8). Wegen des verschiedenen Schüttgewichts von Dolomit und Klaubebergen habe ich die Werte in t/h umgerechnet, wobei sie in einer

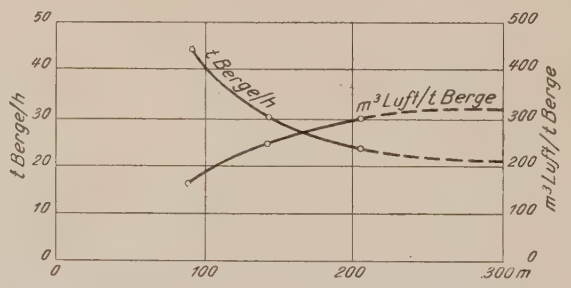

Abb. 8. Blasleistung und spezifischer Luftverbrauch in Abhängigkeit von der Förderlänge bei Miaganlagen.

Kurve zusammenfallen. Die Blasleistung nimmt, wie Abb. 8 zeigt, bis zu 200 m sehr schnell ab, obgleich für jede Förderlänge der größtmögliche Blasdruck angewendet worden ist. Die Ursache muß in dem geringern Luftverbrauch gegenüber den früher beschriebenen Anlagen liegen. Bei Förderlängen von mehr als 200 m wäre demnach eine Blasleistung zwischen 20 und 23 t/h zu erwarten, bei 150 m von etwa 30 t/h. Das letztgenannte Ergebnis stimmt nahezu überein mit der für die Waschberge gefundenen Blasleistung, wenn man m³ an Stelle von t setzt. Die Leistung von 20–23 m³/h Waschberge entspricht den bekanntgewordenen Blasleistungen von Miaganlagen für größere Förderlängen.

Übersicht über die Betriebsgrößen bei besondern Verhältnissen.

Abgesehen von der einfallenden Blasleitung weisen sämtliche Anlagen, die von den zweckmäßigsten Bedingungen abweichen, einen höhern spezifischen Luftverbrauch auf. Der Übersichtlichkeit halber seien die Mittelwerte der behandelten Versuche (Spalte 1) dem entsprechenden Mindestverbrauch (Spalte 2) gegenübergestellt. In der Spalte 3 ist der

spezifische Luftverbrauch bei besondern Verhältnissen in Hundertteilen des Mindestverbrauches bei normaler Leitungsform verzeichnet.

	1	2	3
Strebaufwärtsblasen bei 200 mm Rohrdurchmesser	121	100	121
Einfallende Leitung von 150 mm Dmr. bei 100 m Förderlänge	58	80	72
Einbau von vier 90°-Krümmern bei 200 mm Leitungsdurchmesser . . .	210	100	210
Viele kleine Krümmungen bei 175 mm Dmr. (undichte Leitung)	200	90	210
Miaganlage, 250 mm Dmr. und 150 m Förderlänge	244	123	198
bei größern Förderlängen . . rd.	320	140	229

Aus den Versuchen ist ersichtlich, daß für das Miagverfahren bei größern Förderlängen zur Erzielung einer günstigen Blasleistung auch größere Luftmengen erforderlich sind. Anderseits zeigen die Versuche auf der Zeche G, daß mit der Zunahme der Luftmenge eine Erhöhung des Blasdruckes Hand in Hand gehen muß.

Bemerkenswert ist das Verhältnis der Blasleistungen bei einfallender und ansteigender Strebleitung nach den Versuchen auf der Anlage C (Abb. 9). Mit wachsendem Luftverbrauch nimmt die Blasleistung für die ansteigende Leitung in höherm Maße zu, woraus man schließen kann, daß sich beim Strebaufwärtsblasen mit größern Luftmengen wirtschaftlicher arbeiten läßt.

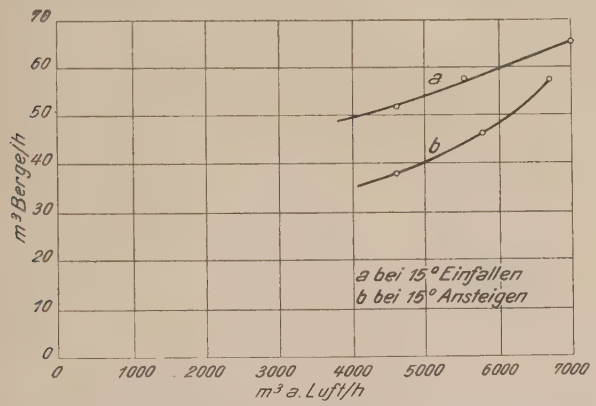

Abb. 9. Blasleistung in Abhängigkeit vom Luftverbrauch für ansteigende und einfallende Strebleitung bei 80 m Streckenlänge.

Zusammenhänge zwischen Blasleistung und Blasdruck.

Der größte Blasdruck und damit die größte Blasleistung waren in allen Versuchen bedingt durch die bei einer bestimmten Grenze eintretende Verstopfungsgefahr. Es soll nunmehr festgestellt werden, wie sich diese beiden Größen bei Änderung der Drehzahl der Aufgabemaschine verhalten. Diese Versuche bieten Gelegenheit, den Unterschied zwischen Hoch- und Niederdruckanlagen klarzustellen und, soweit sie in Versuchsanlagen übertage ausgeführt worden sind, zugleich die Möglichkeit, innerhalb der Versuchsgenauigkeit die Frage zu erörtern, ob der spezifische Druckabfall beim Blasverfahren

$$\frac{\text{Druckabfall bei Förderung}}{\text{Druckabfall bei Leerlauf}} = \frac{\Delta P_m}{\Delta P_L}$$

eine geradlinige Funktion des Mischungsverhältnisses

$$\frac{\text{Fördermenge in kg/h}}{\text{Luftverbrauch in kg/h}} = \frac{G_m}{G_L}$$

darstellt, d. h. ob das Blasversatzverfahren als ein Teilgebiet der pneumatischen Förderung anzusehen ist.

Das Verhältnis zwischen Blasleistung und Blasdruck ist für sämtliche zu diesem Zwecke durchgeführten Versuche in Abb. 10 dargestellt. Für jeden durch eine Kurve dargestellten Versuch sind Luftmenge und Förderlänge konstant gehalten worden. Die Luftmengen entsprechen den bei den einzelnen Verfahren gefundenen Werten. Da sich die Förderlänge in der Abbildung nur durch eine waagrechte Verschiebung der einzelnen Kurven ausdrückt, ist sie für das Versuchsergebnis unwesentlich. Dasselbe gilt auch für den Leitungsdurchmesser.

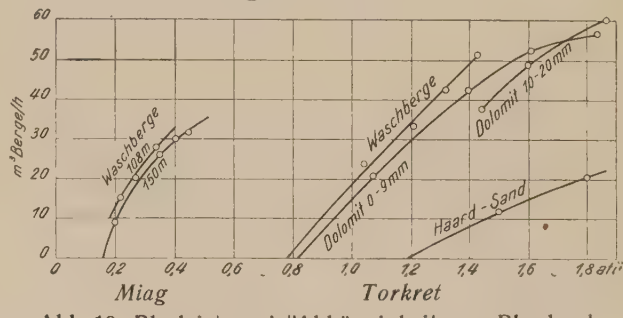

Abb. 10. Blasleistung in Abhängigkeit vom Blasdruck.

Die beiden Kurven zum Miagverfahren sind auf der Versuchsanlage G aufgenommen worden. Die Blasleistung fällt mit dem Blasdruck sehr scharf ab. Die kürzere krümmerlose Leitung läßt bei gleichem Blasdruck eine höhere Blasleistung erkennen.

Die Kurven zum Torkretverfahren zeigen insgesamt ein langsameres Abfallen der Leistung mit dem Blasdruck, und zwar ist diese Erscheinung bei höherm Blasdruck ausgeprägter. Am flachsten verläuft die Kurve beim Haard-Sand. Dies ist zum Teil darauf zurückzuführen, daß der durch dessen Lehmgehalt verursachte Leitungswiderstand bei verhältnismäßig geringern Blasleistungen zunimmt.

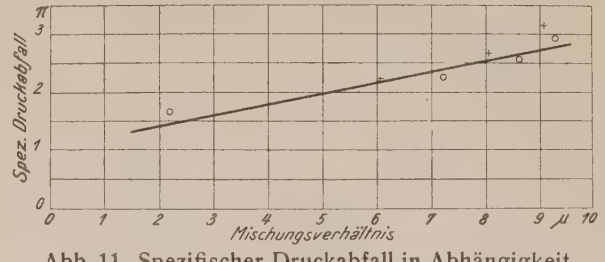

Abb. 11. Spezifischer Druckabfall in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis beim Torkretverfahren für Dolomitsand.

Die Versuche zur Klärung der theoretischen Fragen sind in den Blasanlagen G und H ausgeführt worden. Die Anlage H war eine Torkretanlage von 200 mm Dmr., die einen mittlern Luftverbrauch von

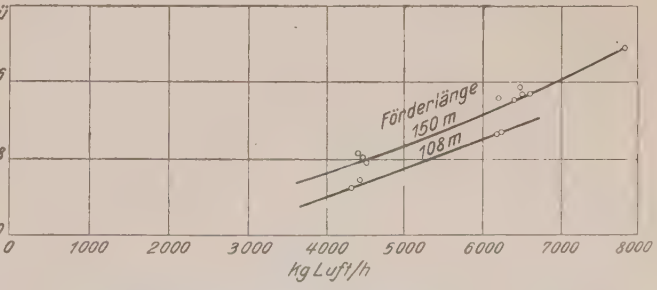

Abb. 12. Leerlaufdruck in Abhängigkeit von der Luftmenge für die Leitung von 250 mm Dmr.

8000 m³/h aufwies. Die Versuche wurden dort mit Dolomit von 0–9 und von 10–20 mm Körnung angestellt, der aus der Aufbereitung einer Erzgrube stammte und daher gleichmäßig gekörnt und schlammfrei war. Der Leerlaufdruck ließ sich mit ziemlicher Genauigkeit bestimmen, weil die Innenwand der Rohrleitung auf Grund des schlammfreien Gutes als glattes Rohr gelten konnte. In Abb. 11 ist der spezifische Druckabfall in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis nach diesen Versuchen dargestellt.

Trotz mancher Versuchsungenauigkeiten bei der Bestimmung der Luftmengen und des Blas- sowie des Leerlaufdruckes ist die geradlinige Abhängigkeit des spezifischen Druckabfalls vom Mischungsverhältnis unverkennbar.

Eine sehr sorgfältige Untersuchung konnte in der Miagversuchsanlage G durchgeführt werden. Man maß den Leerlaufdruck an der Aufgabemaschine mit der Quecksilbersäule und trug die so gefundenen Werte in Abb. 12 in Abhängigkeit von den Luftmengen auf. Daraus ließen sich die Leerlaufdrücke für alle vorkommenden Luftmengen entnehmen und zur Feststellung des spezifischen Druckabfalls verwenden, der in Abb. 13 wiederum in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis aufgetragen worden ist.

Die Abweichungen der gefundenen Werte von den durchgelegten Geraden erklären sich durch den Unterschied in dem Luftverbrauch der jeweils zu einer Gruppe zusammengefaßten Versuche. Die geradlinige Abhängigkeit ist aber deutlich ausgeprägt. Zugleich erkennt man, daß der spezifische Druckabfall bei geringerm Luftverbrauch in stärkerm Maße mit dem Mischungsverhältnis zurückgeht als bei großem. Da sich auch hier eine geradlinige Abhängigkeit des spezifischen Druckabfalls vom Mischungsverhältnis ergeben hat, erscheint es innerhalb der Versuchsgenauigkeit als erwiesen, daß das Blasverfahren im Hinblick auf den Gesamtdruckabfall ein Teilgebiet der pneumatischen Förderung darstellt.

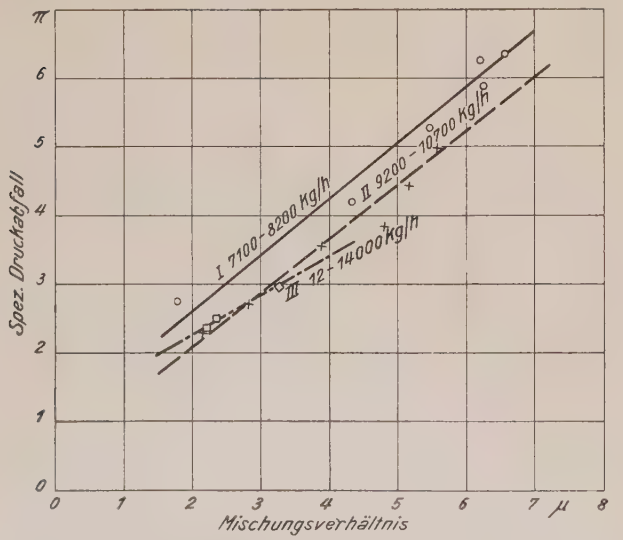

Abb. 13. Spezifischer Druckabfall in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis für verschiedene Luftmengen und 150 mm Förderlänge beim Miagverfahren.

Ein Vergleich der Abb. 11 und 13 veranschaulicht noch den Unterschied zwischen Torkret- und Miagverfahren. Das erstgenannte zeigt eine weit geringere Abnahme des spezifischen Druckabfalls mit dem Mischungsverhältnis als das Miagverfahren, bei dem der spezifische Druckabfall bei gleichem Mischungsverhältnis 2- bis 3mal so groß ist.

Einfluß des Blasgutes auf die Vorgänge in der Blasleitung.

Die Schwebegeschwindigkeit als Hilfsmittel zur Bestimmung der Förderfähigkeit eines Versatzgutes.

Die Waschberge, die, mit den erwähnten Ausnahmen, bei allen bisher besprochenen Versuchen Verwendung fanden, waren als Erzeugnisse der jeweils vorhandenen Aufbereitung von so verschiedener Zusammensetzung, daß es auf jeder Zeche einer gewissen Erfahrung zur Erlangung vergleichbarer Versuchsbedingungen bedurfte. Zur Bildung eines guten Durchschnittes wurden die Versuche auf möglichst große Fördermengen ausgedehnt.

Um den Einfluß des Blasgutes durch eine feste Größe darstellen zu können, versuchte ich zunächst, mit Hilfe des Begriffes der Schwebegeschwindigkeit Klarheit über die Bedeutung der Förderfähigkeit eines Blasgutes zu gewinnen. Das Entgegenkommen der Zechenverwaltung B ermöglichte mir, übertage an einem stillgelegten Schacht die erforderliche Versuchsanlage aufzubauen. Da die Herstellung eines für das grobe Versatzgut genügenden konischen Glasrohres Schwierigkeiten bereitet hätte, wurde auf Vorschlag von Professor Prandtl in Göttingen ein quadratischer Querschnitt gewählt, der nach Prandtls Angabe dieselben Strömungsverhältnisse aufweist wie der runde Querschnitt. Nach einigen Abänderungen wurde die endgültige Versuchseinrichtung nach Abb. 14 ausgeführt, wobei man eine senkrechte Rohrlänge von 14 m vorschaltete, um eine regelmäßige Strömung zu erzielen. Dadurch wurden ursprünglich auftretende Luftwirbel und Geschwindigkeitsunterschiede in den verschiedenen Teilen des Querschnitts vermieden. Für die Messung der Luftgeschwindigkeiten erwies sich ein Pitot-Rohr als genügend genau. Im Versuchsrohr ist auf Grund der Luftgeschwindigkeit und des Rohrdurchmessers turbulente Strömung anzunehmen. Bei der Versuchsdurchführung strömte aus der Rohrleitung viel Wasser mit, so daß besonders bei feuchter Luft ein Wasserstrahl aus dem Gerät emporschoß. Dies beeinträchtigte die Versuche, namentlich bei größern Luftgeschwindigkeiten.

Die zu untersuchenden Waschberge wurden erst einer Siebanalyse unterworfen, wobei die Waschberge von der Zeche B folgende Zusammensetzung zeigten:

Korngröße mm	Gewichtsmenge g	Gewichtsmenge %
> 50	3 600	19,4
30– 50	4 100	22,0
20– 30	3 900	21,0
10– 20	4 900	26,3
5– 10	1 200	6,5
0– 5	900	4,8
0–120	18 600	100,0

Die Waschberge bestanden aus teilweise schwefelkieshaltigem Tonschiefer und Sandstein. Das spezifische Gewicht bewegte sich zwischen 2,3 und 2,6 und überschritt bei schwefelkieshaltigem Gut 3,0.

Die Versuchsdurchführung erfolgte derart, daß man zuerst die kleinsten Korngrößen von oben in das konische Rohr gab und das Luftventil so weit öffnete, bis die Körner den Schwebezustand erreicht hatten. Beim Einstellen größerer Luftgeschwindigkeiten wurde dieses Korn aus dem Rohr hinausgeschleudert und durch die nächsthöhere Kornklasse ersetzt usw., bis alle Korngrößen auf ihre Schwebegeschwindigkeit untersucht waren. Dieser Versuch wurde mehrmals wiederholt.

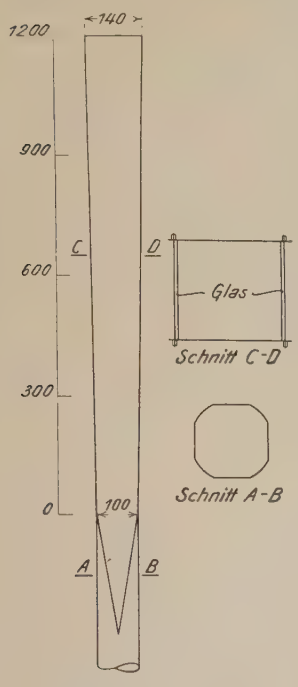

Abb. 14. Vorrichtung zur Bestimmung der Schwebegeschwindigkeit.

Infolge mangelnder Erfahrung zeitigten die ersten Versuche ein wenig brauchbares Ergebnis, ließen jedoch erkennen, daß es nicht möglich war, Korngrößen von mehr als 30 mm in der Vorrichtung zu bestimmen, weil die größern Berge den Rohrquerschnitt versperrten, die der Luftstrom dann plötzlich hinausschleuderte. Deshalb wurden die Versuche auf Korngrößen bis zu 30 mm beschränkt.

Um die Versuchsgenauigkeit anzudeuten, habe ich in den Zahlentafeln 9 und 10 die größte und die kleinste Versuchsschwebegeschwindigkeit angegeben, woraus sich als Mittelwert die gesuchte Versuchsschwebegeschwindigkeit W_1 ergibt. Die Luftgeschwindigkeit erhält man aus dem Pitot-Druck in mm W.-S. nach der Gleichung $w = \sqrt{\frac{2gh}{\gamma_L}}$ m/s. Für den Versuchszweck genügte es, $\frac{\gamma g}{\gamma_L} = 16$ zu setzen, was einem spezifischen Gewicht der Luft von 1,23 entspricht. Dann ist $w = 4\sqrt{h}$ m/s. Für die verschiedenen Schwebehöhen des Gutes im Rohr wurden die Luftgeschwindigkeiten entsprechend dem zugehörigen Rohrquerschnitt berechnet. Zum Vergleich ist auch die berechnete Schwebegeschwindigkeit W_2 angegeben. Diese gilt für eine gedachte Vergleichskugel

Zahlentafel 9.

Versuchszeit Juni 1929.

Korngröße mm	Schwebegeschwindigkeit W_1 größte m/s	kleinste m/s	W_1 m/s	Vergl.-Kugel-Dmr. mm	W_2 m/s	$W_1 : W_2$
0— 5	15,5	10,2	12,8	3,8	13,6	0,94
5—10	19,4	9,8	14,4	8,2	20,8	0,70
10—20	22,5	18,9	20,7	16,5	28,3	0,73
	flache Steine		13,9	16,5	28,3	0,49
20—30	—	—	19,2	26,0	35,4	0,54

vom mittlern Volumen der betreffenden Kornklasse bzw. vom Volumen des untersuchten Einzelkörpers und wird nach der Gleichung $W_2 = \sqrt{28{,}4\gamma k/\gamma L \cdot d_k}$ ermittelt. $W_1 : W_2$ gibt dann das Verhältnis der Versuchsschwebegeschwindigkeit zur berechneten an.

Die Versuchsgeschwindigkeiten sind danach erheblich kleiner als die berechneten, jedoch genügen diese Werte nicht zur schärfern Erfassung der Kornform, deren Einfluß an rechteckigen Holzkörpern untersucht und in der Zahlentafel 10 wiedergegeben worden ist. Darin findet man auch das Verhältnis des wirksamen Körperquerschnitts Q zum Volumen J eingetragen. Als wirksamer Querschnitt sei derjenige bezeichnet, der nach der Versuchsbeobachtung der Luftströmung in der Regel entgegengerichtet war.

Zahlentafel 10.

Versuchszeit Oktober 1929.

Körperabmessungen mm	Schwebegeschwindigkeit W_1 größte m/s	kleinste m/s	W_1 m/s	W_2 m/s	$W_1 : W_2$	Q : J
Holzkugel ($\gamma = 0{,}76$) Dmr. = 29,8 mm	27	25,0	26,0	23,2	1,12	0,50
Holzquader ($\gamma = 0{,}642$)						
24,1 × 23,8 × 23,8	16	14,0	15,0	21,2	0,71	0,57
30,0 × 29,7 × 15,5	15	13,8	14,4	21,3	0,68	0,68
40,4 × 20,8 × 17,3	(15)	14,0	14,0	21,5	0,65	0,58
16,7 × 17,2 × 40,5	(18)	13,0	13,0	20,7	0,63	0,63
40,0 × 40,0 × 8,05	(17)	9,0	9,0	21,0	0,43	1,03

Der geringe Unterschied zwischen der größten und der kleinsten Schwebegeschwindigkeit der meisten Körper beweist die größere Genauigkeit des Versuchs bei den leichten und regelmäßig geformten Holzkörpern. Die in Klammern gesetzten Werte beziehen sich auf den Ausnahmefall, daß die kleinste Fläche der Luftströmung entgegengestanden hat; dieser Wert kommt also für die Mittelbildung nicht in Betracht. Die Schwebegeschwindigkeit der Kugel ist nach dem Versuch größer als nach der Formel. Die übrigen Versuchswerte liegen weit unter der berechneten Schwebegeschwindigkeit, im Mittel bei 0,62 der Kugel gleichen Inhalts. Die Versuchsbeobachtungen haben ergeben, daß die Körper in der Regel die Fläche mit dem größten Querschnitt der Luftströmung zuwenden. Die quaderartigen Körper wenden ihr je nach der Lage des Schwerpunktes die 2 oder 3 Seiten mit dem größten Querschnitt zu. Am kleinsten ist das Verhältnis $W_1 : W_2$ bei den flachen Körpern; es wird desto größer, je kleiner das Verhältnis Q : J, also des wirksamen Querschnitts zum Rauminhalt wird. Die Untersuchung einzelner Steine bestätigte, daß die Schwebegeschwindigkeit der unregelmäßig geformten Körper erheblich niedriger liegt als die von Kugeln gleichen Rauminhaltes und spezifischen Gewichtes. Im Gesamtdurchschnitt der untersuchten Steine war $W_1 : W_2 = 0{,}63$.

Rückblickend sei festgestellt, daß die Schwebegeschwindigkeit, abgesehen von dem spezifischen Gewicht und dem Korndurchmesser, die auch in der bekannten Formel berücksichtigt werden, bedingt ist: 1. vom Verhältnis des wirksamen Kornquerschnitts zum Rauminhalt des Kornes und 2. durch die abgerundete oder kantige Beschaffenheit des Kornes.

Im Betriebsversuch müßte sich also ergeben, daß 1. rolliges Fördergut schlechter zu verblasen ist als kantiges, flächiges, 2. schweres Fördergut schlechter als leichteres, 3. feineres Fördergut besser als grobkörniges.

Betriebsversuche zur Prüfung der Förderfähigkeit von Versatzgut.

Vergleichsversuche mit verschiedenen Arten von Fördergut.

Über die praktische Bedeutung der Förderfähigkeit geben die auf der Zeche H an einer Torkretanlage mit Zweikammermaschine übertage durchgeführten Versuche Aufschluß. Dabei wurden verwendet Klaubeberge (Schiefer) und Waschberge (Dolomit), ferner feuchte und trockne Kesselasche sowie ein sehr feinkörniger Sand mit 95 % Bestandteilen von weniger als 1 mm Korngröße und mit 7 % Lehmgehalt. Die Schwebegeschwindigkeit ist der Feinkörnigkeit entsprechend gering und beträgt rechnerisch bei Annahme von 1 mm mittlerm Korndurchmesser 8 m/s. In der Versuchsleitung wurden 2 · 5 m³ Sand verblasen, wobei man folgendes Ergebnis feststellte.

	Blasleistung m³/h	Blasdruck atü	Förderzeit min
Versuch 1	31,9	1,40	9,5
Versuch 2	28,8	1,89	11,5

Der mittlere Blasdruck beim ersten Versuch war, verglichen mit dem üblichen Blasdruck in dieser Anlage von 1,9 atü, sehr gering. Wollte man ihn höher halten, so trat stets die Gefahr einer Verstopfung auf. Am Ende des ersten Versuchsabschnittes stieg der Blasdruck an und entsprach während des zweiten Versuches dem sonst in dieser Anlage üblichen Blasdruck, wobei sich die Blasleistung etwas verminderte. Diese Zunahme des Blasdruckes war bedingt durch den Lehmgehalt des Sandes, der die Rohrleitung allmählich verschmierte und so einen größern Reibungswiderstand erzeugte. Durch anschließend verblasene Asche wurde die Leitung in kurzer Zeit wieder gereinigt. Die Blasleistung bei diesen Versuchen erreichte nur rd. 50 % des sonst in dieser Anlage erzielten Betrages, was später noch eingehender erklärt wird. Durch Mischungen des Sandes mit Asche und Dolomit versuchte man, die Blasleistung zu verbessern. Die Durchschnittswerte für die Förderleistung bei verschiedenem Versatzgut und Mischungen in einer Torkret- und einer Zellenradanlage wurden mir von der Zeche H laut Zahlentafel 11 angegeben; sie stellen nur Vergleichswerte für die Förderfähigkeit verschiedenen Versatzgutes dar ohne Beziehung zum Begriff der Blasleistung.

Kennzeichen der Bauart	Torkretanlage, Zweikammermaschine	Zellenrad der Carlshütte
Rohrdurchmesser . . mm	203	250
Förderlänge . . . . . m	rd. 400	100
Luftverbrauch . . m³/h	rd. 8000	rd. 7200
Blasdruck . . . . . atü	1,9	0,4

Beim Verblasen grobkörnigen Versatzgutes, wie von Klaubebergen, grober Kesselasche und grobkörnigem Dolomit, ergaben sich also die größten Blasleistungen. Mit der Abnahme der Korngröße tritt deutlich eine Verminderung der Förderleistung ein, bis bei einem größern Hundertsatz an lettigen Bestandteilen jede Fördermöglichkeit aufhört. Die Mischungen von Sand und Dolomit lieferten bei geringen Sandbeimischungen sehr günstige Werte, die jedoch mit der Zunahme des Sandanteils abfielen. Eine gewisse Ähnlichkeit in den Versuchsergebnissen ist bei der Torkret- und der Zellenradanlage erkennbar, jedoch prägt sich die geringe Förderfähigkeit eines Gutes beim Zellenrad in einer größern Verminderung der Blasleistung aus.

Zahlentafel 11.

Fördergut	Förderleistung Torkret m³/h	Förderleistung Miag m³/h
Klaubeberge (Schüttgew. 900 kg/m³)	68	22,0
Kesselasche 20–60 mm	60	24,4
Kesselasche 0–10 mm	42	9,0
Dolomit 20–40 mm	52	21,2
Dolomit 10–20 mm	45	16,9
Dolomit 0– 9 mm	40	13,1
Sand, gemischt mit Dolomit im Verhältnis 1:4	54	—
Sand, gemischt mit Dolomit im Verhältnis 1:2	46	—
Sand, gemischt mit Dolomit im Verhältnis 1:1	40	—
Sand mit 7 % Lehmgehalt	32	5,8
Sand mit 15 % Lehmgehalt	praktisch keine Blasleistg.	
Sand, gemischt mit Asche 1:2	43	—
Sand, gemischt mit Asche im Verhältnis 1:1	38	—
Lettige Haldenberge	18	—

Vergleichsversuche mit Waschbergen und Haard-Sand.

Die Haard, ein sandreicher Landstrich im Norden des Ruhrbezirks, soll das Versatzgut für zahlreiche Ruhrzechen liefern. Die damit angestellten Versuche, denen daher erhebliche wirtschaftliche Bedeutung zukommt, sind auf der Anlage A bei 400 m Förderlänge ausgeführt worden. Mehr als 99 % dieses Sandes wiesen weniger als 0,5 mm Korngröße auf; der Lehmgehalt betrug 1,10 %. Der Sand war also etwas feiner als der vorher verwendete, hatte aber einen geringern Lettengehalt. Das beim Verblasen von 27 m³ Sand gefundene Versuchsergebnis ist aus der Zahlentafel 12 zu ersehen.

Zahlentafel 12.

Versuchstag 14. April 1930.

Blasleistung m³/h	Blasdruck atü	Fördermenge m³	Luftverbrauch m³/h	Spezifischer Luftverbrauch m³/m³
23,2	1,3–1,8	8,50	3900	170
27,5	1,3–1,8	3,25	3900	143
22,0	1,7	3,35	3900	179
21,0	1,8	3,25	3900	187
19,6	1,8	3,31	3900	204
20,5	1,8	1,80	3950	194
Waschberge, im Anschluß verblasen				
39,5	2,0	25,00	3940	101
Vergleichsversuch mit Waschbergen am 16. April 1930				
39,3	1,9	95,00	3920	102

Die Blasleistung ging während des Versuches auf rd. 20 m³/h zurück. Da der Maschinenführer besonders vorsichtig gefahren ist, kann man als Mittelwert eine etwas höhere Blasleistung annehmen. Durch Vergleich mit den Kurven über den Druckabfall ergibt sich bei einem üblichen Blasdruck von 1,9 atü eine mittlere Blasleistung von 24 m³/h. Die durchschnittliche Blasleistung für Waschberge beträgt demgegenüber beim Vergleichsversuch 39 m³/h, was einer Förderfähigkeit des Sandes von 60 % im Vergleich dazu entspricht. Die geringere Förderfähigkeit des Sandes muß auf der kugeligen Gestalt des Sandkornes beruhen, die ein sehr ungünstiges Verhältnis des wirksamen Querschnitts zum Korninhalt bedingt. Anderseits verdanken die Waschberge ihrer flächigen Gestalt die Eignung als Versatzgut. Die Änderung des

Blasdruckes während der Förderung erfolgte ähnlich wie beim Sandversuch auf der Zeche H; sie wurde hier nur abgeschwächt durch den geringen Lehmgehalt.

In derselben Blasanlage stellte man später Versuche mit Mischungen von Sand und Waschbergen an, weil vom bergmännischen Standpunkt aus das Verblasen von reinem Sand wegen der starken Staubentwicklung im Streb nicht befriedigen konnte. Hierbei ergaben sich Blasleistungen, die teilweise sogar größer waren als bei Vergleichsversuchen mit reinen Waschbergen, während sich die lästige Staubentwicklung auf ein erträgliches Maß verminderte.

Ergebnisse der Versuche über den Einfluß des Blasgutes.

Die Ergebnisse der Schwebegeschwindigkeitsbestimmung und der praktischen Versuche über die Förderfähigkeit lassen sich wie folgt zusammenfassen.

1. In beiden Fällen beobachtet man ein übereinstimmendes Verhalten hinsichtlich der Form des Versatzkornes. Das Verhältnis des wirksamen Kornquerschnitts zum Rauminhalt besitzt einen überragenden Einfluß auf die Blasleistung wie auf die Schwebegeschwindigkeit. Je größer dieses Verhältnis, desto geringer ist die Schwebegeschwindigkeit und desto größer die Blasleistung. In der Förderung drückt sich diese Erscheinung dadurch aus, daß sich das Versatzgut mit abnehmender Korngröße der ungünstigsten Gestalt, der Kugelform, nähert und infolgedessen eine geringere Blasleistung ergibt.

2. Der Einfluß des spezifischen Gewichtes tritt demgegenüber im Betrieb in den Hintergrund. Das liegt einerseits daran, daß sich die spezifischen Gewichte des Fördergutes, abgesehen von der Asche, wenig unterscheiden; sie schwanken zwischen 2,3 und 2,9. Als Vergleichsgröße für die Blasleistung wurde aber das Schüttgewicht zugrunde gelegt, das außer vom spezifischen Gewicht von andern Eigenschaften des Fördergutes abhängt. Immerhin scheint die höhere Blasleistung für Klaubeberge und Asche im Vergleich mit dem grobkörnigen Dolomit auf dem Unterschied im spezifischen Gewicht zu beruhen.

3. Durch die Schwebegeschwindigkeit nicht erfaßbar ist der Einfluß, den der Lehm- und Schlammgehalt des Versatzgutes auf den Blasvorgang ausübt. Das Verschmieren der Rohrleitung erhöht deren Widerstand und beeinträchtigt dadurch die Blasleistung. Der Reibungsanteil des Druckabfalls wird auf Kosten des Druckabfalls vermehrt, der zur Beschleunigung der Massen zur Verfügung steht.

Aus den vorstehenden Erörterungen geht hervor, daß die Berechnung der Schwebegeschwindigkeit für beliebig geformte Versatzstoffe nach der Formel $w_s = \sqrt{28{,}4 \cdot \gamma k/\gamma L \cdot d_k}$ keine zutreffenden Werte liefert. Man muß noch einen Koeffizienten einfügen, der das Verhältnis des wirksamen Kornquerschnittes zum Volumen berücksichtigt. Für mittlere Waschberge beträgt er nach den Versuchen etwa 0,60 und wächst mit der Abnahme der Korngröße bis zum Werte 1. Die Formel für die Schwebegeschwindigkeit von Waschbergen lautet demnach

$$w_s = 0{,}60 \sqrt{28{,}4 \cdot \gamma k/\gamma L \cdot d_k}.$$

Druckabfall und Bewegungszustände in der Rohrleitung.

Die sehr verwickelten Vorgänge in der Förderleitung sind bei der Durchführung der Versuche im Großbetriebe nur zum kleinen Teil erkennbar. Da sich die Fördergeschwindigkeit des Versatzgutes in der Blasleitung nicht einwandfrei ermitteln ließ, war nur der Druckabfall als wichtigster Aufschluß für die Fördervorgänge zu untersuchen.

Versuche zur Bestimmung des Druckabfalls in der Blasleitung.

Versuchsdurchführung.

Der Druckabfall vom Eintritt des Gutes bis zur Ausblasestelle entspricht dem aus frühern Versuchen bekannten Blasdruck. Zur Bestimmung der Luftdrücke in der Rohrleitung konnte diese nicht ohne weiteres angebohrt werden, weil sich diese Öffnung sofort mit Schlamm zugesetzt hätte. Durch Verwendung des in Abb. 15 wiedergegebenen Druckabnehmers, der dem von Gasterstädt ähnelt, wird dies vermieden und die Möglichkeit ausgeschaltet, daß neben dem statischen Druck die Geschwindigkeitshöhe die Messungen beeinflußt.

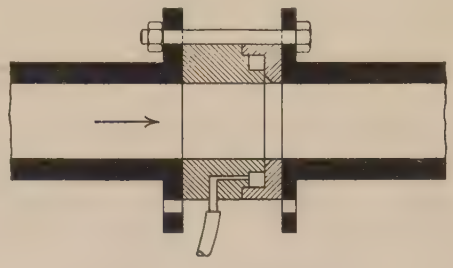

Abb. 15. Druckabnehmer.

Der Druckabnehmer besteht aus 2 Ringen, deren innerer Durchmesser dem der Rohrleitung entspricht. Die beiden Ringe greifen so ineinander ein, daß sie einen ringförmigen Hohlraum einschließen, der nach der Rohrinnenseite durch einen schmalen Schlitz, nach außen mit dem anzuschließenden Manometer durch eine Bohrung verbunden ist. Den innen um den Rohrumfang verlaufenden Spalt bemißt man mit Hilfe einer Papiereinlage im äußern Teil des Ringes nach Bedarf, gewöhnlich ½ mm breit. Der Druckabnehmer wird zwischen die Bordringe eines Rohrstoßes mit Hilfe längerer Schrauben eingebaut. Um dem Verschlämmen des innern Spaltes durch schlammige Waschberge abzuhelfen, drehte man den Spalt rings um den Innenrand des Ringes einseitig konisch ab, so daß die Luftströmung die sich hinter der senkrechten Kante festsetzenden Schlammteile mitreißen konnte, bevor sie sich verfestigten.

Kleinere Rohrleitungsdrücke, etwa bis zu 0,70 atü, wurden mit quecksilbergefüllten U-Röhren gemessen, die mit Hilfe eines Gasschlauches an die Druckabnehmer angeschlossen waren. Bei höhern Drücken verwendete man Manometer. Die Ablesung des Druckes mußte mit besonderer Vorsicht erfolgen, weil der Blasdruck und damit die Leitungsdrücke ständigen Schwankungen unterworfen sind, die durch den fortwährenden Wechsel in der Art und Menge des eben verblasenen Gutes verursacht werden. Zur Gewinnung eines brauchbaren Mittels bedarf es erst einer ausreichenden Versuchserfahrung.

Der Druckabfall in der Blasversatzanlage A.

Die Bestimmung des Druckabfalls mußte sich an die Versuche zur Bestimmung der Betriebsgrößen des Blasverfahrens anschließen. Es galt daher, die Veränderung der Leitungsdrücke bei Änderung sowohl

der einfallenden Strebförderlänge als auch der waagrechten Streckenlänge zu untersuchen.

Die Leitungsdrücke wurden in dieser Anlage an 8 Meßstellen bestimmt, die so angeordnet waren, daß vor allem die Abschnitte mit den größten Druckänderungen, also in der Nähe der Aufgabemaschine und des Strebkrümmers, berücksichtigt wurden. Da die Entfernung des Krümmers von der Maschine veränderlich ist, werden die dort angebrachten Meßstellen auf ihren Abstand vom Krümmer bezogen. Für die Benennung der Meßstellen wird die Leitung in der Richtung des Blasstromes betrachtet. Demnach bedeutet z. B. vor dem Krümmer den Abschnitt zwischen Krümmer und Blasmaschine.

Anordnung der Meßstellen.

Meßstelle	
1	Aufgabemaschine (= Blasdruck)
2	3,8 m hinter der Aufgabemaschine
3	21,8 m „ „ „
4	2 m vor dem Krümmer
5	2 m hinter dem Krümmer
5a	3 m „ „ „
6	10 m „ „ „
7	50 m „ „ „

Die Drücke konnten für den einzelnen Versuch gleichzeitig nur an zwei bis drei Meßstellen abgelesen werden. Der zugehörige Druck für die andern Meßstellen wurde durch wiederholte Ablesungen bestimmt, wobei man zwischen den Meßstellen abwechselte.

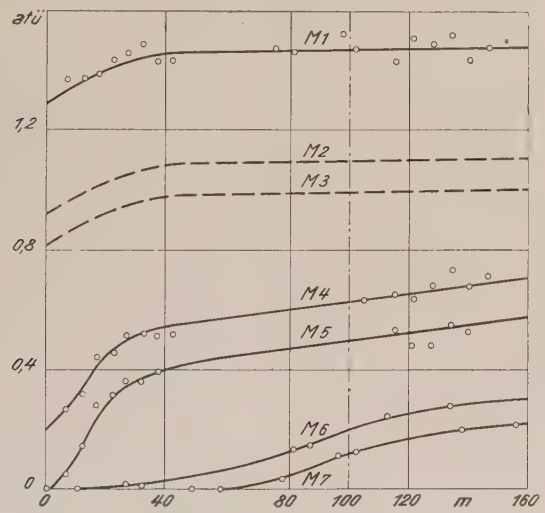

Abb. 16. Druckänderungen in der Normalleitung von 150 mm Dmr. bei Änderung der Strebförderlänge für die waagrechte Streckenlänge von 135 m.

In Abb. 16 sind die Rohrleitungsdrücke bei Änderung der einfallenden Strebförderlänge für zweckmäßigste Blasleistung, entsprechenden Blasdruck und Luftverbrauch wiedergegeben. Trotz der aus der Streuung der Punkte erkennbaren Versuchsungenauigkeiten gibt die zeichnerische Darstellung ein einfaches Bild der Druckänderungen an den Meßstellen beim Verblasen eines Strebs.

Die Änderung des Blasdruckes (M_1) ist aus der Feststellung der Betriebsgrößen bekannt. Nur bei kurzen Strebrohrlängen ist M_1 davon abhängig. Eine erhebliche Druckverminderung stellt sich naturgemäß bei kurzen Strebförderlängen vor dem Krümmer ein. Der Schnittpunkt der Kurve M_4 mit der Senkrechten, auf der die Drücke bei 0 m Förderlänge im Streb aufgetragen sind, stellt den durch den Krümmer bedingten Druckabfall dar, da dieser Punkt sonst mit dem Koordinatenschnittpunkt zusammenfallen müßte. Der Druckverlauf bei M_1 zeigt im übrigen von 30 m Strebrohrlänge an ein gleichmäßiges Ansteigen. Ähnlich verläuft die Kurve M_5, deren Schnittpunkt mit der Abszisse = 2 m (Einbaustelle des Druckabnehmers) gegeben ist. Die Kurven M_6 und M_7 weisen ebenfalls eine gleichmäßige Zunahme des Druckes mit der Verlängerung der Strebleitung auf. Übereinstimmend ergibt sich für M_4, M_5, M_6 und M_7 für kurze Strebrohrlängen ein im Verhältnis zum sonstigen Kurvenverlauf geringerer Druck, der desto kleiner wird, je näher die Ausblasestelle an den Krümmer rückt. Dieser geringere Druck ist also bedingt durch den kurzen Abstand der Ausblasestelle vom Krümmer, wodurch der Weg für den Beschleunigungsdruckabfall hinter dem Krümmer verkürzt wird. Ein Vergleich der Kurven M_5 und M_6 zeigt, daß der durch den Krümmer bedingte Druckabfall zwischen M_5 und M_6, also zwischen 2 und 10 m hinter dem Krümmer, sein Ende findet.

Zur Darstellung des Druckabfalls in der ganzen Leitung sind Parallelen zur Ordinate zu ziehen. Die Schnittpunkte mit den Kurven entsprechen dann den Leitungsdrücken an den betreffenden Meßstellen bei 135 m Streckenleitung. In Abb. 17 sind die Druckabfallskurven II, III und IV für die Strebförderlängen 20, 100 und 160 m gezeichnet.

Der scharfe Druckabfall hinter dem Krümmer ist bei 5 m Entfernung beendet. Dies muß also die zur Beschleunigung des im Krümmer abgebremsten Versatzgutes notwendige Weglänge sein. Der Druckabfall vollzieht sich hinter der Beschleunigungsstrecke gleichmäßig, ist also eine geradlinige Funktion der Streblänge.

Zur Gewinnung des gesamten Druckabfallbildes wurde noch der Druckabfall hinter der Blasmaschine bei 314 m Streckenlänge ermittelt. In Abb. 17 gibt die Kurve V die gefundenen Mittelwerte wieder. Der Beschleunigungsweg hinter der Aufgabemaschine ist daraus zu rd. 8 m zu entnehmen. Der daran anschließende geradlinige Druckabfall für die waagrechte Strecke verläuft steiler als der für die einfallende Strebleitung. Die waagrechte Strecke ruft also einen größern Druckabfall hervor. Das Maß für die Größe des Druckabfalls bei waagrechter und einfallender Leitung ist gegeben durch den Unterschied der Winkel, welche die beiden Geraden mit der Abszisse bilden.

Die Änderung des Druckabfalls in Abhängigkeit von der waagrechten Förderlänge ist aus den in der Zahlentafel 13 für drei verschiedene waagrechte Streckenlängen angegebenen Leitungsdrücken bei 100 m Strebrohrlänge ersichtlich.

Zahlentafel 13.

Streckenlänge m	M_1 atü	M_2 atü	M_3 atü	M_4 atü	M_5 atü	M_{5a} atü	M_6 atü	M_7 atü
65	1,35	—	—	0,64	—	—	—	0,12
135	1,49	—	—	0,64	0,50	—	0,20	0,11
314	2,00	1,63	1,53	0,65	—	0,44	—	—

Der Druckabfall hinter dem Krümmer ist in den drei Fällen gleich groß, was auch für den Druckabfall der Anfangsbeschleunigung anzunehmen ist. Die nicht ermittelten Werte sind daher entsprechend

ergänzt und in Abb. 17 für die Kurven I bis IV nachträglich eingetragen worden. Vergleicht man den durch die Anfangsbeschleunigung bedingten Druckabfall mit dem Krümmerdruckabfall, so ergibt sich ein nur geringer Unterschied. Die kinetische Energie des Fördergutes wird also im Krümmer nahezu vollständig vernichtet. Der Beschleunigungsweg hinter der Maschine ist um rd. 3 m länger als hinter dem Krümmer, was auf dem Einfallen der Strebleitung beruht.

Der geradlinige Druckabfall hinter der Anfangsbeschleunigung stellt den Druckabfall dar, der in der geraden Leitung entsteht, wenn bei gleichbleibendem Luftverbrauch die der Förderlänge entsprechende Blasleistung erzielt wird. Verlängert man die Geraden, so müssen ihre Schnittpunkte mit der Abszisse die Förderlänge ergeben, die unter Beibehaltung der zugehörigen Blasleistung bei gerader Leitung erreicht würde. Für die Kurven I, III und V betragen diese Entfernungen 200, 340 und 520 m, die man bei den mittlern Blasleistungen von 48, 44 und 37 m³/h und bei 3750 m³ Luftverbrauch je h erreichen würde.

Der Unterschied zwischen Torkret- und Miaganlagen drückt sich sehr deutlich auch im Verlauf des Druckabfalls aus.

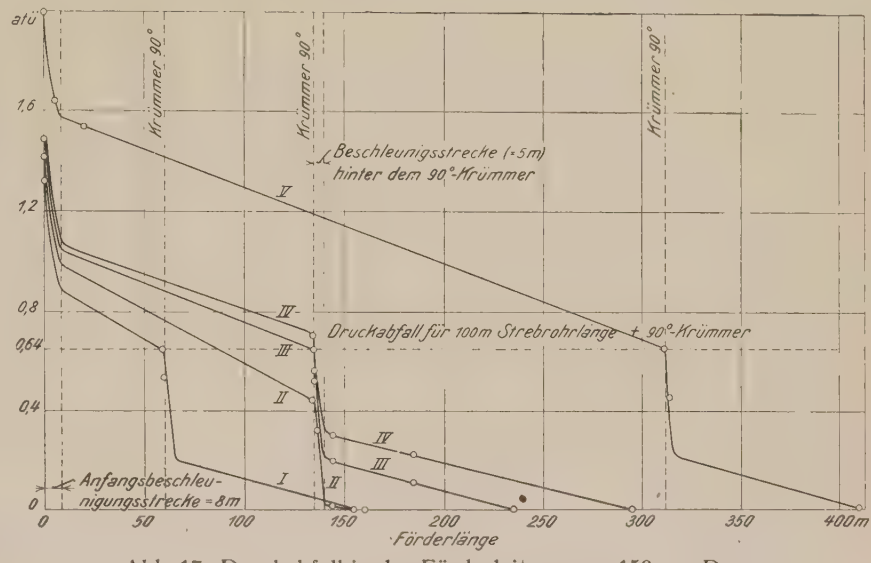

Abb. 17. Druckabfall in der Förderleitung von 150 mm Dmr. bei verschiedenen Förderlängen.

Da die Kurven bei verschiedenem Luftverbrauch aufgenommen worden sind, folgen sie einander nicht genau nach der Größe der Blasleistung, wenn auch deren allmähliche Verminderung von oben nach unten nicht zu verkennen ist. Der Beschleunigungsweg des Fördergutes beträgt bei der Förderleitung von 150 m rd. 21 m. An den Beschleunigungsweg schließt sich wieder der gleichmäßige Druckabfall als geradlinige Funktion der Förderlänge an. Ungleich steiler als für die Anfangsbeschleunigung vollzieht sich hinter dem Krümmer der Druckabfall, der 8 m dahinter beendet ist. Der anschließende gleichmäßige Druckabfall entspricht dem geradlinigen Verlauf vor dem Krümmer.

Eine sehr geringe Ausprägung des Beschleunigungsdruckabfalls beobachtet man bei der geraden Leitung von 108 m Länge. Die Beschleunigungsstrecke geht nur allmählich in die Strecke des gleichmäßigen Druckabfalls über und erreicht erst bei 50 bis 60 m Abstand vom Zellenrad ihr Ende. Dies erklärt sich vor allem durch das Fehlen eines Krümmers. Bei größern Luftmengen verläuft der Druckabfall steiler, weil der Arbeitsaufwand im Verhältnis zur Luftmenge geringer ist.

Der Unterschied zwischen Hoch- und Niederdruckanlagen beruht nach den Druckabfallkurven im wesentlichen auf dem verschiedenen Verhalten in

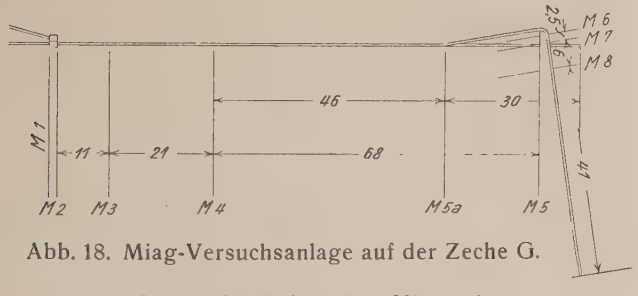

Abb. 18. Miag-Versuchsanlage auf der Zeche G.

Druckabfall bei der Miaganlage.

In Abb. 18 ist die Versuchsanlage übertage dargestellt. Der Druckabfall konnte hier sehr genau untersucht werden, weil sich der Leitungsdruck an zahlreichen Meßstellen zugleich ablesen ließ. In den Abb. 19 und 20 sind die Versuchsergebnisse mit zweifacher Überhöhung gegenüber Abb. 17 dargestellt, und zwar geordnet nach Blasleistung und Luftverbrauch, worüber die Zahlentafel 14 unterrichtet.

Zahlentafel 14.

Kurve	Blasleistung m³/h	Luftverbrauch m³/h
	Abb. 19	
I	24,7	10 560
II	26,2	9 360
III	18,9	9 360
IV	20,3	6 640
V	9,4	7 160
	Abb. 20	
I	27,7	6 360
II	23,5	9 830
III	14,2	6 560
IV	18,8	10 440

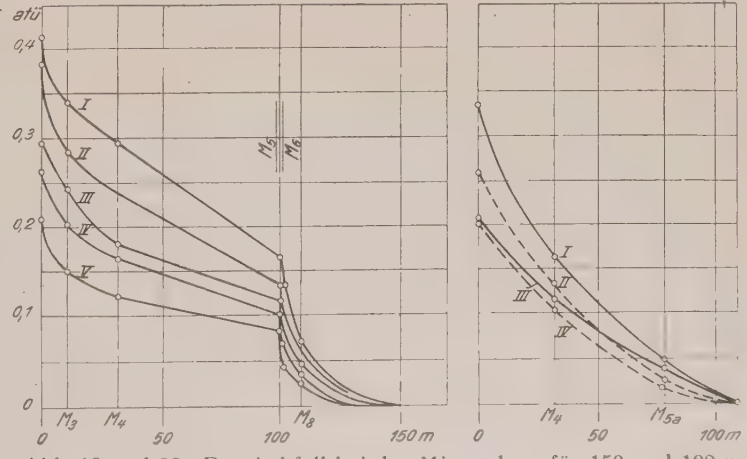

Abb. 19 und 20. Druckabfall bei der Miaganlage für 150 und 108 m Förderlänge bei verschiedenen Blasleistungen und Luftmengen.

der Anfangsbeschleunigungsstrecke. Der Beschleunigungsweg beträgt beim Hochdruckverfahren 8 m, beim Niederdruckverfahren dagegen 21 m, das ist beinahe das Dreifache. Entnimmt man aus den Abb. 17 und 19 durch Abmessen die Rohrleitungsdrücke bei 100 m Förderlänge bis zum Krümmer für den Anfang (M_1) und das Ende (B_E) des Anfangsbeschleunigungsweges, so ergibt sich folgendes:

	M_1 atü	B_E atü	Luftverbrauch m³/h	Luftgeschwindigkeit w_{M_1} m/s	Luftgeschwindigkeit w_{B_E} m/s	Verhältnis $w_{B_E} : w_{M_1}$
Hochdruckanlage, 150 mm Dmr.	1,40	0,97	3750	24,6	30,0	1,22
Niederdruckanlage, 250 mm Dmr. (Kurve IV, Abb. 19)	0,26	0,18	6640	29,9	31,9	1,07

Die Änderung der Luftgeschwindigkeit in der Beschleunigungsstrecke ist für das Hochdruckverfahren in diesem Falle etwa dreimal so groß wie für das Niederdruckverfahren. Bezogen auf die Einheit der Streckenlänge tritt beim Hochdruckverfahren eine rd. 8mal so große Änderung der Luftgeschwindigkeit ein. Obgleich der Unterschied im Rohrdurchmesser nicht berücksichtigt ist, läßt sich aus diesem Beispiel doch entnehmen, daß die Änderung der Luftgeschwindigkeit, bezogen auf die gleiche Länge des Beschleunigungsweges, den entscheidenden Unterschied zwischen den beiden Verfahren darstellt.

Die Bewegungszustände in der Rohrleitung.

Die Untersuchung des Druckabfalls in der Rohrleitung im Zusammenhang mit den Versuchen über den Einfluß des Fördergutes ermöglicht nunmehr eine Kennzeichnung der Materialbewegung in der Richtung der Förderleitung.

Das mit geringer Geschwindigkeit in die Blasleitung eintretende Versatzgut wird zunächst stark beschleunigt. Die Länge des Beschleunigungsweges ist abhängig von der Luftgeschwindigkeit und dem Aufgabedruck. Beim höchsten Aufgabedruck für die vorhandene Luftgeschwindigkeit erreicht auch der Beschleunigungsweg seinen geringsten Wert. Der Aufgabedruck wird vor allem beschränkt durch den Einfluß des Blasgutes, der sich sowohl in der Beschleunigungsstrecke als auch in der anschließenden Strecke des gleichmäßigen Druckabfalls, die weiterhin als Reibungsstrecke bezeichnet sei, geltend macht. Der Einfluß des Blasgutes ist dabei bedingt: 1. durch die Beschleunigungsfähigkeit des Fördergutes und 2. durch den Reibungswiderstand in der Rohrleitung.

In der Beschleunigungsstrecke tritt die Beschleunigungsfähigkeit, also die Eigenschaft des Fördergutes in den Vordergrund, die mit Hilfe der Schwebegeschwindigkeitsbestimmung untersucht worden ist. Hierbei zeigen verschiedenartige Versatzstoffe ein abweichendes Verhalten.

Für Versatzgut, das einen großen wirksamen Querschnitt, also gute Förderfähigkeit aufweist, wie z. B. grobe Waschberge, hat, wie oben dargelegt, die Änderung der Luftgeschwindigkeit in der Einheit der Beschleunigungsstrecke ausschlaggebende Bedeutung für die zu erreichende Förderleistung. Die üblichen Anfangsluftgeschwindigkeiten des Blasverfahrens von 20–30 m/s genügen für dieses Fördergut.

Für feinkörnige Körper liegen die Verhältnisse wesentlich anders. Darüber gibt eine in der Versuchsanlage H beim Verblasen feinkörnigen Sandes gemachte Beobachtung Aufschluß. Die für lehmfreien Sand erreichte Blasleistung betrug zur Zeit der Beobachtung etwa 38 m³/h. Eines Tages zeigte sich eine allmähliche Zunahme der Förderleistung, die schließlich auf 50 m³/h stieg, eine Leistung, die man in dieser Anlage sonst nur mit gut förderbarem Gut erreichte. Beim Verblasen grobkörniger Klaubeberge trat dann eine Verstopfung ein. Als man die Leitung öffnete, zeigte sich, daß diese von der Maschine an auf rd. 6 m so zugesetzt war, daß der Rohrquerschnitt an der Maschine nur die Hälfte des gewöhnlichen betrug und sich allmählich konisch erweiterte, bis er bei 6 m wieder normal war. Dieser Abstand entspricht ungefähr der Beschleunigungsstrecke, in der durch diese Verengung eine außergewöhnliche Zunahme der Luftgeschwindigkeit erfolgte. Der Blasdruck stieg während des Vorganges von 1,4 auf 1,85 atü. Bei einem Luftverbrauch von 8000 m³/h bedeutet dies also eine Zunahme der Luftgeschwindigkeit von 29 auf 50 m/s.

Diese Beobachtung beweist, daß die Luft in der Anfangsbeschleunigungsstrecke noch wenig durchgewirbelt ist und daher nur in der Rohrmitte eine große Geschwindigkeit hat, wodurch sich der Lehm an der Rohrwandung festsetzen konnte. Das feine Gut hat erst durch die erhöhte Luftgeschwindigkeit die für eine gute Blasleistung bei diesem Versatzgut erforderliche Beschleunigung erhalten. Die Luftgeschwindigkeit von 50 m/s ist aber etwa 6mal so groß wie die mittlere Schwebegeschwindigkeit des Sandes, so daß ein Zusammenhang zwischen Schwebegeschwindigkeit und Förderfähigkeit nicht zu erkennen ist. Für rolliges, feinkörniges Gut scheint also vor allem die Größe der Luftgeschwindigkeit für die zu erreichende Förderleistung maßgebend zu sein.

Der Einfluß der Rohrreibung tritt naturgemäß in der Beschleunigungsstrecke wegen ihrer geringen Länge etwas zurück. Trotzdem können infolge der starken Beschleunigung des Fördergutes die Reibungswiderstände plötzlich so groß werden, daß sie seine kinetische Energie übertreffen und somit eine Verstopfung herbeiführen.

Die Reibungsstrecke ist in den Abbildungen durch den geradlinigen Druckabfall gekennzeichnet. Auch hier erfährt das Fördergut noch eine geringe Beschleunigung, wie sich aus der Beobachtung schließen läßt, daß der Krümmerverschleiß mit der dem Krümmer vorgeschalteten geraden Rohrlänge zunimmt. Der dafür aufzuwendende Druckabfall ist vermutlich gegenüber der Reibungsarbeit gering. Besonders die Versuche mit lehmhaltigem Sand lassen deutlich den Einfluß der Rohrreibung erkennen. Da diese zudem mit der Materialgeschwindigkeit quadratisch wächst, kann der Druckabfall nicht ganz gleichmäßig vor sich gehen, sondern muß in der Nähe des Krümmers größer sein als am Anfang der Reibungsstrecke. Wegen des Fehlens entsprechender Messungen ist dies in den Abbildungen nicht

berücksichtigt worden. Die Zunahme der Reibungsarbeit bei längern geraden Rohrstrecken erklärt auch das stärkere Ansteigen des Blasdruckes, das in Strecken von mehr als 200 m Länge trotz Abfalls der Blasleistung festgestellt worden ist. Die geringere Blasleistung ist zum Teil auf die dadurch hervorgerufene Verminderung der Rohrreibung zurückzuführen. Wahrscheinlich nimmt der Reibungswiderstand mit wachsender Förderlänge allmählich so zu, daß die Blasleistung praktisch gleich Null wird.

Setzt man diese Anschauung als richtig voraus, so wäre die größte Blasleistung überhaupt durch die Reibungswiderstände bestimmt, soweit nicht die Beschleunigungsfähigkeit des Fördergutes am Anfang der Rohrleitung eine Rolle spielt. Daraus ergibt sich eine einfache Deutung der versuchsmäßigen Feststellung, daß die Blasleistung unter sonst entsprechenden Verhältnissen eine gerade Funktion des Rohrdurchmessers ist. Nimmt man angenähert an, daß sich die in Rohrleitungen von verschiedenem Durchmesser zu leistende Reibungsarbeit umgekehrt wie der innere Rohrumfang verhält, dann müssen sich die Blasleistungen bei gleicher Materialgeschwindigkeit wie der Querschnitt der Rohrleitungen zu ihrem Umfang verhalten, also wie $\frac{d^2\pi}{4} : d\pi$, d. h. wie eine gerade Funktion des Rohrdurchmessers.

An die Reibungsstrecke schließt sich bei der Normalanlage der 90°-Krümmer an, in dem das Gut nach den Gesetzen über den Stoß in die Strebleitung geschleudert wird; es folgt also nicht dem Luftstrom, weshalb Krümmer von kleinem Krümmungsradius geeigneter sind als solche mit großem. Im Betriebe hat sich daher auch gezeigt, daß der Krümmerverschleiß bei kleinem Krümmungsradius geringer ist. In der Versuchsanlage H hatte man drei Krümmer von je 4 m Radius eingebaut, die nach Durchgang von rd. 200 m³ Versatzgut verschlissen waren und durch solche von 0,75 m Krümmungsradius ersetzt wurden. Dabei ergab sich eine Leistungszunahme von 20%. Liegt der Krümmer aber innerhalb der Beschleunigungsstrecke, so hat das Fördergut erst eine geringe Geschwindigkeit erreicht und folgt noch der Luftströmung; dort sind also Krümmer von großem Krümmungsradius angebracht. In der Blasanlage E wurden in der Nähe der Aufgabemaschine in kurzen Abständen drei Krümmer von 90° und je 3 m Krümmungsradius eingebaut, die keine merkliche Beeinträchtigung der Blasleistung verursachten. Für die Beschleunigungsstrecke hinter dem Krümmer gilt das für die Anfangsbeschleunigung Gesagte. Die Verstopfungsgefahr ist am Krümmer infolge der Vorgänge beim Aufprallen des Fördergutes am größten. Im Betriebe treten dort die meisten Verstopfungen auf.

In der Strebleitung hinter dem Krümmer zeigt der gleichmäßige, durch das Einfallen des Strebs etwas verminderte Druckabfall, daß sich dort die gleichen Vorgänge wie in der Reibungsstrecke abspielen.

Die gegebene Erklärung der Leistungsverminderung bei größern Förderlängen berücksichtigt nicht den Einfluß der Luftgeschwindigkeit. Infolge der Zunahme des Blasdruckes mit der Förderlänge nimmt bei gleichem Luftverbrauch die Anfangsluftgeschwindigkeit wie auch die Zunahme der Luftgeschwindigkeit in der Einheit der Förderstrecke mit wachsender Förderlänge immer mehr ab. Die Verminderung der Blasleistung muß zum Teil auf diesem Einfluß beruhen, jedoch ist dessen Größe aus den Versuchen nicht erkennbar.

Bei der Besprechung der Sandförderung auf der Zeche H konnte der Grund für den geringen Blasdruck (1,4 atü anstatt wie üblich 1,9 atü) nicht angegeben werden. Diese Erscheinung ist nunmehr durch die geringe Beschleunigungsfähigkeit des Sandes zu erklären, die notwendig eine Verminderung der Förderleistung im Gefolge hat. Würde man bei konstanter Luftmenge eine größere Fördermenge, als zulässig ist, aufgeben, so erhielte man bei dem dadurch bedingten höhern Blasdruck eine noch geringere Anfangsluftgeschwindigkeit, welche die Blasleistung noch mehr beschränken und eine Verstopfung herbeiführen würde.

Zusammenfassung der für den Blasbetrieb wichtigen Ergebnisse.

Hauptziel der vorstehenden Untersuchungen war die Feststellung der Verhältnisse, bei denen für 1 m³ der zu verblasenden Bergemenge der geringste Luftverbrauch benötigt wird (spezifischer Luftverbrauch). Den Versuchen wurde eine waagrechte Streckenleitung, die mit einem 90°-Krümmer in die mit rd. 10° einfallende Strebleitung überging, zugrunde gelegt. Man fand, daß zur Erzielung des geringsten spezifischen Luftverbrauches eine dem Rohrdurchmesser entsprechende Luftmenge angewendet werden muß. Der Blasdruck ist so hoch zu halten, daß eben keine Verstopfung der Blasleitung eintritt. Für verschiedene Rohrdurchmesser wurde unter diesen Voraussetzungen ermittelt, daß die Blasleistung eine geradlinige, der Luftverbrauch dagegen eine quadratische Funktion des Leitungsdurchmessers ist. Der spezifische Luftverbrauch nimmt also mit dem Rohrdurchmesser zu, und zwar um 26% von 150 auf 200 mm und um 53% von 150 auf 250 mm Dmr. Vom Standpunkt des Luftverbrauchs aus ist demnach ein kleinerer Blasleitungsdurchmesser vorzuziehen.

Ferner wurden Blasleistung und Blasdruck in Abhängigkeit von der Förderlänge bestimmt. Von 0 bis 300 m Förderlänge ergab sich eine Verminderung der Blasleistung um rd. 25%. Der Leitungsdurchmesser einer Blasanlage ist so zu wählen, daß auch bei der größten vorgesehenen Entfernung die verlangte Versatzleistung erreicht wird. Aus den Blasdruckkurven läßt sich bei normaler Form der Blasleitung der höchste vor Ort einer Anlage erforderliche Luftdruck entnehmen.

Bei allen von den zweckmäßigsten Verhältnissen abweichenden Blasanlagen beobachtet man einen höhern spezifischen Luftverbrauch. Dies gilt sowohl für eine andere Form der Blasleitung als auch für die Anwendung einer im Verhältnis zum Rohrdurchmesser geringern Luftmenge und eines geringern Blasdruckes. Beim Strebaufwärtsblasen ergab sich ein um 20%, beim Einschalten mehrerer Krümmungen in die Leitung ein um 110% erhöhter Luftverbrauch. Bei Miaganlagen kann der spezifische Luftverbrauch sogar um mehr als 2000% höher sein, wobei allerdings der geringere Erzeugungswert von Luft niedrigen Druckes zu beachten ist. Eine Ausnahme bildet die nur im Einfallen verlegte Blasleitung, wobei der spezifische Luftverbrauch nur 72% des sonst ermittelten Mindestverbrauches betrug.

Entnimmt man die Blasluft dem Niederdrucknetz der Zeche, so ist es vorteilhaft, die Luftzufuhr durch eine Mengenreglung auf das erforderliche Mindestmaß zu beschränken. Dadurch wird Luftvergeudung, besonders beim Verblasen wenig geeigneten Fördergutes, vermieden. Bei größern Förderlängen sowie beim Verblasen entgegen dem Einfallen ist jedoch die Verwendung größerer Luftmengen wirtschaftlicher.

Der spezifische Luftverbrauch wurde zunächst für das übliche Blasgut der Ruhrzechen, die Waschberge, festgelegt unter Annahme einer mittlern Mischung. Werden die Waschberge ungemischt verblasen, so zeigen sich größere Abweichungen von den ermittelten Durchschnittsleistungen. Die Verminderung der Blasleistung bei feinkörnigen Waschbergen ist am geringsten in der Blasleitung von 150 mm Dmr. Sie betrug ebenso wie die Zunahme beim Verblasen grobkörnigen Gutes etwa 10 %. Bei größern Rohrdurchmessern wurden Abweichungen nach unten um mehr als 20 %, beim Strebaufwärtsblasen sogar um 50 % festgestellt.

Die Bestimmung der Förderfähigkeit verschiedener Versatzstoffe erfolgte mit Hilfe der Schwebegeschwindigkeit sowie durch ergänzende Betriebsversuche. Es ergab sich, daß sie im wesentlichen von der Form des Versatzkornes bestimmt wird. Je größer das Verhältnis des der Luftströmung zugekehrten Querschnitts, des sogenannten wirksamen Querschnitts, zum Rauminhalt des Versatzkorns ist, desto besser läßt sich ein Versatzgut verblasen. Dieses Verhältnis entspricht in der Regel der Korngröße, so daß die Blasleistung mit deren Zunahme ansteigt. Bei Versatzgut von gleicher Korngröße ist das mit abgerundeten Kanten, also das rollige Material, weniger geeignet als das scharfkantige. Geringere Bedeutung kommt im Vergleich damit dem spezifischen Gewicht zu.

Feinkörniges Gut weist im allgemeinen eine erheblich geringere Leistung auf. Für Sand wurde eine Förderfähigkeit von 60 % im Vergleich mit Waschbergen und von rd. 50 % verglichen mit Klaubebergen ermittelt. Zudem hat sich beim Verblasen von Sand eine sehr starke Staubentwicklung im Streb eingestellt. Betriebsversuche, bei denen Mischungen von Sand mit grobkörnigern Bergen verblasen wurden, erbrachten bei geringen Sandbeimischungen Förderleistungen, die sogar etwas höher waren als die beim Verblasen des betreffenden Materials allein erreichten. Für Mischungen mit Waschbergen gilt das gleiche, wobei zudem die Staubentwicklung im Streb auf ein erträgliches Maß zurückgeht.

Auf einen andern Weg zur Erreichung höherer Blasleistungen beim Verblasen ausschließlich feinkörnigen Gutes weist die Beobachtung hin, daß eine größere Luftgeschwindigkeit am Anfang der Blasleitung mit feinkörnigem Material nahezu dieselbe Leistung ermöglicht wie mit grobkörnigerm. Die Rohrleitung wäre also an der Maschine auf den halben Querschnitt zu bringen und allmählich zu erweitern, so daß sie erst bei 6–8 m Abstand von der Maschine den gleichmäßigen Querschnitt erreicht. In der Mehrzahl der Betriebe kommt eine solche Änderung jedoch nicht in Frage, weil neben feinkörnigem Gut stets auch grobkörniges versetzt werden muß. Außerdem müßte man Vorkehrungen treffen, um der Staubplage vorzubeugen.

Besondere Beachtung ist dem Gehalt eines Versatzgutes an lettigen Bestandteilen zu schenken. Schon geringe Beimengungen setzen die Blasleistung herab, weil sie den Rohrleitungswiderstand erhöhen. Sind etwa 15 % im Blasgut vorhanden, so ist das Material für das Blasverfahren nicht mehr brauchbar; deshalb lassen sich die meisten Haldenberge für den Blasversatz nicht verwenden.

Die Untersuchung des Druckabfalles in der Förderleitung lenkte die Aufmerksamkeit auf den Rohr- und Krümmerverschleiß. Es liegt auf der Hand, daß die höhern Leistungen der Torkretanlagen auch größere Fördergeschwindigkeiten und damit einen höhern Verschleiß bedingen. Die Frage des zweckmäßigsten Krümmers hängt zugleich mit dem Verschleiß und der Blasleistung zusammen. Innerhalb der Beschleunigungsstrecke — das sind beim Hochdruckverfahren im höchsten Fall 8, beim Niederdruckverfahren etwa 20 m — folgt das Blasgut der Luftströmung. Hier kann man einen großen Krümmungsradius anwenden, weil die Blasleistung dadurch nicht beeinträchtigt wird und der Verschleiß sich in engen Grenzen hält. Bei größern Abständen des Krümmers von der Aufgabemaschine bzw. vom letzten 90°-Krümmer ist ein kleiner Krümmungsradius zu bevorzugen, weil dabei nur ein einmaliges Aufprallen des Gutes und infolgedessen ein geringerer Verschleiß auftritt. Wiederholtes Aufprallen, das bei großem Krümmungsradius unvermeidbar wäre, vermindert zudem die Blasleistung.

Der Einfluß der Aufgabevorrichtung konnte im allgemeinen bei den Untersuchungen unberücksichtigt bleiben, weil sie für diese Betrachtungen eine untergeordnete Rolle spielt, die eben darin besteht, daß sie die erforderliche Materialzufuhr bei luftdichtem Abschluß unter dem notwendigen Blasdruck gestattet. Die gefundenen Ergebnisse gelten also sinngemäß für alle Blasanlagen, bei denen ähnliche Verhältnisse in bezug auf Luftmenge und Blasdruck herrschen.

Druck von C. W. Haarfeld, Essen

Lebenslauf.

Ich wurde am 21. August 1901 als Sohn des Guts- und Brauereibesitzers Alois Deuschl in Grafing (Oberbayern) geboren. Nach fünfjährigem Besuch der Volksschule in Grafing trat ich in die Realschule Traunstein ein, ging nach 2 Jahren zur Realschule Rosenheim über und erwarb mir schließlich das Reifezeugnis der Oberrealschule in Passau im Frühjahr 1921. Nach halbjähriger praktischer Tätigkeit in Peißenberg wurde ich im Herbst 1921 an der Technischen Hochschule in München als Studierender des Bergfaches immatrikuliert. Weitere 6 Monate arbeitete ich während der Hochschulferien auf verschiedenen Gruben Bayerns, Westfalens und Sachsens. Meine Studien führten mich von München nach Clausthal und anschließend nach Freiberg, wo ich sie mit der Erwerbung des Diplomingenieurgrades beendete. Im März 1927 fand ich eine Anstellung als Steiger bei der Vereinigte Stahlwerke A. G., Gruppe Hamborn, die ich nach einjähriger Tätigkeit wieder verließ, um mich zunächst einer Ausbildung im Deutschen Institut für technische Arbeitsschulung zu unterziehen und um mich anschließend der Untersuchung der mit der vorliegenden Arbeit zusammenhängenden Fragen zu widmen.